

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Marek Szpyrc

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Měření technický otřesů a monitoring vibrací pomocí  
nízkonákladového pneumatického systému

Measurement of Blasting Operations and Vibration Monitoring by  
Low-Cost Pneumatic System

## Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Szpyrc**  
Studijní program: B0714A150001 Řídicí a informační systémy  
Téma: **Měření technických otřesů a monitoring vibrací pomocí  
nízkonákladového pneumatického systému  
Measurement of Blasting Operations and Vibration Monitoring  
by Low-Cost Pneumatic System**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Bakalářská práce se věnuje problematice nízkonákladového pneumatického systému pro měření vibrací ve stavebním průmyslu (např. trhací práce, technické odstřely, ražení tunelů apod.) Pro realizaci experimentů budou aplikovány pneumatické senzory, které jsou vyvíjeny v rámci odborné skupiny MĚŘENÍ A SENZORY. Cílem práce bude výzkum a analýza využití konstrukčně nejjednoduššího pneumatického systému jako alternativy ke konvenčním seismickým stanicím. Práce se zaměřuje na detailní popis vybraných způsobů měření vibrací ve stavebním průmyslu (např. trhací práce, technické odstřely, ražení tunelů apod.) Záměrem bakalářské práce je experimentální ověření funkčnosti navržených senzorů v reálném prostředí. Na základě realizovaných experimentů bude stanovena přesnost navržených senzorů vůči relevantní referenci.

### Postup řešení:

1. Podrobná literární rešerše současného stavu problematiky měření vibrací ve stavebním průmyslu, jejich principu a charakteru měřeného signálu (trhací práce, technické odstřely, ražení tunelů apod.) Porovnání jednotlivých způsobů měření vibrací ve stavebním průmyslu. Rozbor legislativy a požadavků na zařízení pro měření vibrací ve stavebním průmyslu. Druhy měřicích přístrojů a jejich princip.
2. Návrh a realizace nízkonákladového pneumatického systému pro měření vibrací ve stavebním průmyslu za využití pneumatického senzoru. Testování vlivu velikosti, tvaru, materiálu, zapouzdření, umístění, způsobu zpracování naměřených signálů, apod.
3. Návrh a realizace experimentálních měření pro stanovení přesnosti navržených senzorů v reálném prostředí. Návrh aplikace pro relevantní verifikaci přesnosti na základě komerčně dostupných systémů pro měření vibrací.
4. Statistické zpracování dosažených výsledků.
5. Diskuze dosažených výsledků.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BROŽ, Milan, Jaroslav ŠTRUNC, Jiří MÁLEK a Martin LINDA. New Generation Seismological Datalogger BRS32-USB and its Application in Induced Seismicity Monitoring. *International Journal EGERSE*, 2014, XXI.1, str.35-46. ISSN 1803-1447.
- [2] KIEHL, J., J. WERFLING a W. Wittke. *Measurements and analyses of blasting vibrations*. In: 10 th ISRM Congress, South Africa. Sandton: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering 2003, pp. 635-640; ISRM-10CONGRESS-2003-107.

- [3] STOLÁRIK, Martin a Radovan KUKUTSCH. *Experimentální seizmické měření v tunelu - vliv umístění senzoru na kvalitu záznamu* = *Experimental seismic measurement in tunnel - influence of sensor locating on quality of record*. Geotechnika. 2011, 14(1), 34-38. ISSN 1211-913X.
- [4] JAYASINGHE, B., Z. ZHAO, A.T.C. GOH, H. ZHOU a Y. GUI. Attenuation of rock blasting induced ground vibration in rock-soil interface. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Volume 11, Issue 4, Pages 770-778. ISSN 1674-7755. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.12.009.
- [5] BHANDARI, Sushil. *Engineering Rock Blasting Operation*. Rotterdam: A.A.Balkema, 1997. ISBN-10: 9054106638.
- [6] VANĚK, Stanislav. *Měření a analýza seizmických vln*. Brno, 2018. 60 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací.
- [7] ŠKERÍK, Jan. *Problematika technické seismicity při budování podzemních děl*. Praha, 2018. Magisterská práce. České učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra geotechniky.
- [8] PETŘÍK, Tomáš, Markéta LEDNICKÁ, Zdeněk KALÁB a Eva HRUBEŠOVÁ. Analysis of Technical Seismicity in the Vicinity of Reconstructed Road. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava*, 2012. s.1-10. ISSN 1804-4824. DOI:10.2478/v10160-012-0005-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Radek Martinek, Ph.D.**


Konzultant bakalářské práce: Ing. Jakub Kolařík  
Ing. Martin Stolárik, Ph.D.

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020



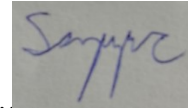
  
doc. Ing. Jiří Koziolek, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 15. 5. 2020



.....  
Podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Radku Martinkovi, Ph.D. za konzultace mé práce, připomínky a věnovaný čas. Dále bych chtěl poděkovat konzultantům Ing. Jakub Kolařík za pomoc a rady ohledně vyhodnocení dat a Ing. Martin Stolarík, Ph.D. za kontrolu bakalářské práce.

Tato práce vznikla za podpory projektu Platforma pro výzkum orientovaný na Průmysl 4.0 a robotiku v ostravské aglomeraci, CZ.02.1.01/0.0/0.0/17\_049/0008425 financovaného z EFRR.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se věnuje problematice nízkonákladového pneumatického systému pro měření vibrací ve stavebním průmyslu (např. trhací práce, technické odstřely, ražení tunelů apod). Pro realizaci experimentů budou aplikovány pneumatické senzory, které jsou vyvíjeny v rámci odborné skupiny MĚŘENÍ A SENZORY. Cílem práce bude výzkum a analýza využití konstrukčně nejjednoduššího pneumatického systému jako alternativy ke konvenčním seismickým stanicím. Práce se zaměřuje na detailní popis vybraných způsobů měření vibrací ve stavebnictví (např. trhací práce, technické odstřely, ražení tunelů apod). Záměrem bakalářské práce je experimentální ověření funkčnosti navržených senzorů v reálném prostředí. Na základě realizovaných experimentů bude stanovena přesnost navržených senzorů vůči relevantní referenci.

## **Klíčová slova:**

Měření vibrací ve stavebním průmyslu, nízkonákladový pneumatický systém, měření vibrací

## **Abstract**

Bachelor thesis is devoted to the issue of low cost pneumatic system which is used to measure vibration in the construction industry ( etc. Blasting work, technical blasting, tunneling,...). It also focuses on detailed description of various methods how the vibration can be measured. For the experiments we will apply pneumatics sensors, which are being developed within the expert group called MEASURING AND SENSORS. The aim of this work will be research and analysis of the constructionally easiest way how to use the pneumatic system as an alternative to conventional seismic stations. The aim of this bachelor thesis is to experimentally verify a functionality of designed sensor in real environment. Based on the realized experiments we will determine the accuracy of the designed sensors against the relevant reference.

## **Key words:**

Vibration measurement in the building industry, low cost pneumatic systém, measuring vibration

# Obsah

1	Úvod .....	3
2	Vibrace.....	4
2.1	Vibrace a kmitání.....	4
2.2	Druhy vibrací .....	6
2.3	Seismicita.....	7
2.3.1	Přírodní seismicita .....	7
2.3.2	Technická seismicita .....	8
2.3.3	Indukovaná seismicita .....	8
3	Senzory a měření.....	9
3.1	Senzor .....	9
3.2	Měření technických otřesu a vibrací .....	9
3.3	Rozdělení seismických vln .....	9
3.4	Posuzování stavebních objektů .....	10
3.5	Požadavky na vibrační snímače .....	12
4	Snímače rychlosti .....	13
4.1	Seismografy .....	13
4.2	Seismometry .....	13
4.3	Setrvačný seismometr .....	13
4.4	Geofony .....	14
4.5	Snímače zrychlení – akcelerometry.....	16
4.5.1	Piezoelektrický akcelerometr .....	16
4.5.2	Piezorezistivní akcelerometr .....	17
4.5.3	Kapacitní akcelerometry .....	17
4.5.4	Použití akcelerometrů .....	18
4.6	Senzory vyvinuté VŠB-TUO.....	18
4.7	Interferometrický senzor - zhutňování.....	18
4.7.1	Princip a konstrukce .....	18
4.7.2	Měření .....	19
4.8	Interferometrický senzor, akustický senzor – trhací práce .....	20
4.8.1	Princip a konstrukce .....	20
4.8.2	Měření .....	21



5	Praktická část.....	22
5.1	Popis měření se schématy.....	22
5.2	Popis schématu měření.....	23
5.3	Konstrukce použitých senzorů .....	24
5.3.1	Pneumatické senzory .....	24
5.3.2	Akustický senzor .....	24
5.3.3	Seismograf.....	25
5.4	Vyhodnocení naměřených dat .....	25
5.5	Záznamy dat a kalibrace signálu.....	25
5.6	Časová oblast senzorů.....	26
5.7	Frekvenční oblast senzorů.....	35
5.8	Stanovení přesnosti senzorů .....	37
5.8.1	Průběh stanovení přesnosti .....	37
5.8.2	Histogramy .....	38
6	Závěr.....	40

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

### Seznam ilustrací

Obr. 1 Příčné a podélné vlnění .....	4
Obr. 2 Podélné vlnění.....	5
Obr. 3 Rozdělení vibrací. ....	6
Obr. 4 Stacionární, Nestacionární a impluzní jev. ....	7
Obr. 5 Blokové schéma senzoru.....	9
Obr. 6 Objemová deformace způsobená podélnými vlnami A), a příčnými vlnami B. ....	10
Obr. 7 Povrchová deformace způsobená Rayleigho vlnami A), a Loveho vlnami B).....	10
Obr. 8 Tlumený vertikální oscilátor.....	14
Obr. 9 Konstrukce geofonu. ....	15
Obr. 10 Konstrukce akcelerometru.....	16
Obr. 11 Konstrukce kapacitního akcelerometru. ....	17
Obr. 12 Schéma interferometrických měření. DFB, distribuovaná zpětná vazba.....	19
Obr. 13 Senzor umístěný v krabici.....	19
Obr. 14 Schéma akustického senzoru. ....	20
Obr. 15 Nízkonákladový akustický senzor.....	21
Obr. 16 Schéma měření pro obě vzdálenosti 120-140 cm,(60)cm. ....	22
Obr. 17 Fotografie použité měřicí techniky. ....	24
Obr. 18 Signály před kalibrací .....	26
Obr. 19 Signály po kalibraci.....	26
Obr. 20 Časová oblast seismografu (VK). ....	27
Obr. 21 Časová oblast seismografu (MK). ....	27
Obr. 22 Časová oblast pneu. senzoru 1 (VK). ....	27
Obr. 23 Časová oblast pneu. senzoru 1 (MK). ....	27
Obr. 24 Časová oblast pneu. senzoru 2 (VK). ....	27
Obr. 25 Časová oblast pneu. senzoru 2 (MK). ....	27
Obr. 26 Časová oblast pneu. senzoru 3 (VK). ....	28
Obr. 27 Časová oblast pneu. senzoru 3 (MK). ....	28
Obr. 28 Časová oblast akustického senzoru (VK). ....	28
Obr. 29 Časová oblast akustického senzoru (MK). ....	28
Obr. 30 Časová oblast seismografu (VK). ....	29
Obr. 31 Časová oblast pneumatického senzoru 1 (VK). ....	29
Obr. 32 Časová oblast pneumatického senzoru 2(VK). ....	29
Obr. 33 Časová oblast pneumatického senzoru 3 (VK). ....	30
Obr. 34 Časová oblast akustického senzoru (VK). ....	30
Obr. 35 Časová oblast seismografu (VK). ....	31
Obr. 36 Časová oblast seismografu (VK). ....	31
Obr. 37 Časová oblast pneu. senzoru 1 (VK). ....	31
Obr. 38 Časová oblast pneu. senzoru 1 (MK). ....	31

Obr. 39 Časová oblast pneu. senzoru 2 (VK).....	31
Obr. 40 Časová oblast pneu. senzoru 2 (MK).....	31
Obr. 41 Časová oblast pneu. senzoru 3 (VK).....	32
Obr. 42 Časová oblast pneu. senzoru 3 (MK).....	32
Obr. 43 Časová oblast akustického senzoru (VK).....	32
Obr. 44 Časová oblast akustického senzoru (MK).....	32
Obr. 45 Časová oblast seismografu (VK).....	33
Obr. 46 Časová oblast pneumatického senzoru 1 (VK).....	33
Obr. 47 Časová oblast pneumatického senzoru 2 (VK).....	33
Obr. 48 Časová oblast pneumatického senzoru 3 (VK).....	34
Obr. 49 Časová oblast akustického senzoru (VK).....	34
Obr. 50 Frekvenční spektrum před filtrací.....	35
Obr. 51 Frekvenční spektrum po filtraci.....	35
Obr. 52 Frekvenční spektrum seismografu.....	36
Obr. 53 Frekvenční spektrum senzorů.....	36
Obr. 54 Histogram odchylek (60cm, velké kladivo).....	38
Obr. 55 Histogram odchylek (120cm, malé kladivo).....	39
Obr. 56 Histogram odchylek (120cm, velké kladivo).....	39

#### **Seznam tabulek**

Tab. 1: Efektivní rychlosti kmitání.....	11
Tab. 2: Efektivní rychlosti kmitání.....	11
Tab. 3: Konstanty zesílení.....	25
Tab. 4: Výsledné hodnoty pro jednotlivé údery vzdálenost (120cm).....	37
Tab. 5: Výsledné hodnoty pro jednotlivé údery, vzdálenost (60cm).....	38

# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření a analýzy vibrací. Práce je hlavně zaměřená na stavební oblast. Jedná se o velmi aktuální téma neboť města a jejich komunikace se stále zhušťují a místa na povrchu nezbývá mnoho. Možností výstavby nových komunikací a objektů na povrchu je růst staveb směrem do výšky, ale to nebývá pro mnoho typů staveb vhodné. Alternativním řešením části problémů je výstavba města směrem dolů pod povrch. Toto řešení se především týká států a měst s dobrou ekonomickou situací, protože toto řešení je jak finančně, tak i technologicky náročné. Pro výstavbu podzemních objektů je nutné odstranit horniny. K ražení podzemních děl se dnes využívají mohutné razicí stroje, které mechanicky rozpojují horniny. Problémem těchto strojů je ekonomická nevhodnost pro některé typy prací a také možnost vypořádat se se složitějšími příčnými i půdorysnými tvary. V téhle situaci přichází na řadu aplikace trhavých prací. Jejich využití však přináší nežádoucí účinky, vzniklé seizmické vlny mají vliv na zemský povrch, podzemní sítě a stavby. Důvodem měření je vysoký nárok hlavně na bezpečnost a eliminaci rizik vzniklých během trhavých prací. Důkladně se hodnotí možné rizika již v momentu, kdy se o trhavých pracích pouze uvažuje.

Teoretická část bakalářské práce se zabývá problematikou měření vibrací ve stavebnictví. Dále obsahuje popis komerčních přístrojů, které se využívají pro měření během trhavých prací, technických odstřelů, ražení tunelů apod. Popis, na jakém principu tyto přístroje pracují, dále jak vyhodnocují naměřená data, a technické provedení těchto systému.

Cílem experimentální části bakalářské práce použití konstrukčně nejjednoduššího pneumatického systému jako alternativy ke konvenčním seismickým stanicím. Dále otestovat vliv materiálu a zapouzdření na přesnost a citlivost. Naměřená data následně budou porovnána ke konvenčním hodnotám seismických stanic.

Experimentální měření bylo realizováno na Fakultě stavební Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Jednalo se o měření vibrací vzniklých během úderu bucharu. Buchar byl vybaven kladivem, které bylo možné obměnit za jiné. Vzdálenosti pro měření byly stanoveny na 120 cm a 60 cm od zdroje vibrací. Pro získání většího počtu dat a následné přesnější vyhodnocení bylo v plánu měřit 200 úderů pro obě vzdálenosti a pro dvě různě velké kladiva.

K vyhodnocení dat byla provedena kalibrace, která převedla jednotky z námi zvolených senzorů na stejné jednotky, v jakých měřila referenční stanice. Dále bylo provedeno zpracování signálu v časové a frekvenční oblasti. Závěrečná část vyhodnocení se zabývá přesností senzorů a stanovení jejich odchylek. V časové oblasti jsou signály z pneumatických senzorů téměř shodné s referenčním signálem. Frekvenční oblast nám odhalila dominantní frekvence signálů pro jednotlivé senzory.

Přesnost senzorů byla stanovena na základě statistiky jednotlivých úderů a dosáhlo se velmi dobrých výsledků pro všechny tři pneumatické senzory.

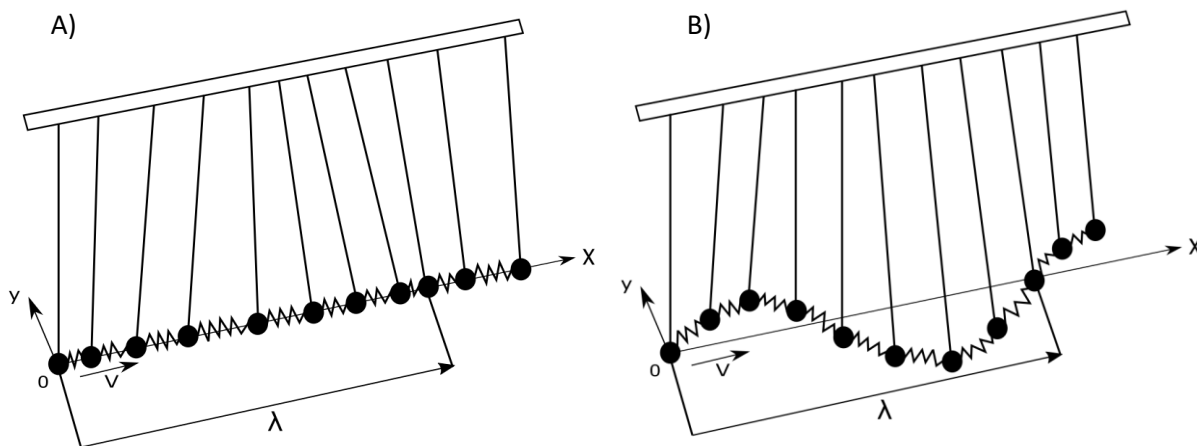
## 2 Vibrace

Měření vibrací je důležitá část pro stavební průmysl. Jak již bylo zmíněno v úvodu, při tvorbě podzemních děl vznikají nežádoucí účinky, vzniklé seizmické vlny mají vliv na zemský povrch, podzemní sítě a stavby, podrobněji v [1],[3],[5]. Může dojít k poškození nebo narušení staveb, které se mohou zhroutit nebo poškodit. To vede k finančním ztrátám popřípadě k ohrožení na lidských životech. Díky měření vibrací můžeme, těmto rizikům předejít viz [1].

### 2.1 Vibrace a kmitání

Pod pojmem vibrace si můžeme představit pohyb, který koná prostředí nebo pružné těleso kolem své rovnovážné polohy a mechanický kmit. Šíření v látkovém prostředí tedy šíření v pevných, kapalných a plynných látkách, nazýváme mechanické vlnění. Principem mechanického vlnění je přenos kmitání ve zmíněném látkovém prostředí, přičemž toto vlnění nemá vliv na přenos látky.

Mechanické vlnění dělíme, podle toho, jak částice kmitají, pokud kmitají, ve směru vlnění jedná se o vlnění podélné (ukázka podélného vlnění- Obr. 1 A), částice kmitající kolmo ke směru vlnění nazýváme příčné (ukázka příčného vlnění-Obr. 1 B), viz [9]. Příklad příčného vlnění si můžeme představit jako chvění tyče, do které jsme, udeřili kladivem nebo vlnění hladiny rybníka. Podélné jako šíření zvuku ve vzduchu.



Obr. 1 Příčné a podélné vlnění.

Na obrázku 1 je řada jednotlivých kyvadel vzájemně propojených, které demonstrují pohyb příčného a podélného vlnění. Pokud dojde k vychýlení prvního kyvadla ve směru osy y (Obr. 1 A), postupně začnou tímto směrem kmitat i ostatní kyvadla. Po rozhoupání prvního kyvadla ve směru osy x (Obr. 1 B) se začnou kývat i ostatní kyvadla ve směru osy x.

## Matematický popis pro podélnou i příčnou postupnou vlnu

Postupné mechanické vlnění popíšeme vztahem, který umožňuje určit okamžitou výchylku v každém bodě řady, k čemu nám poslouží Obr. 2, viz [17]. Výchylka není závislá nejen na čase  $t$ , ale i na vzdálenosti  $x$  od zdroje vlnění. Vlnění se liší od kmitání tím, že okamžitá výchylka kmitajícího bodu je jen funkcí času podle rovnice

$$y = y_m \cdot \sin \omega t. \quad (2.1)$$

Vlnění se šíří řadou hmotných bodů ze zdroje Z, který kmitá harmonicky. Rychlost vlnění je  $v$ . Doba, za kterou vlnění dospěje do bodu M ve vzdálenosti  $x$  se rovná

$$\tau = \frac{x}{v}. \quad (2.2)$$

Pro kmitání bodu M bude platit vztah:

$$y = y_m \cdot \sin \omega(t - \tau) = y_m \cdot \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right). \quad (2.3)$$

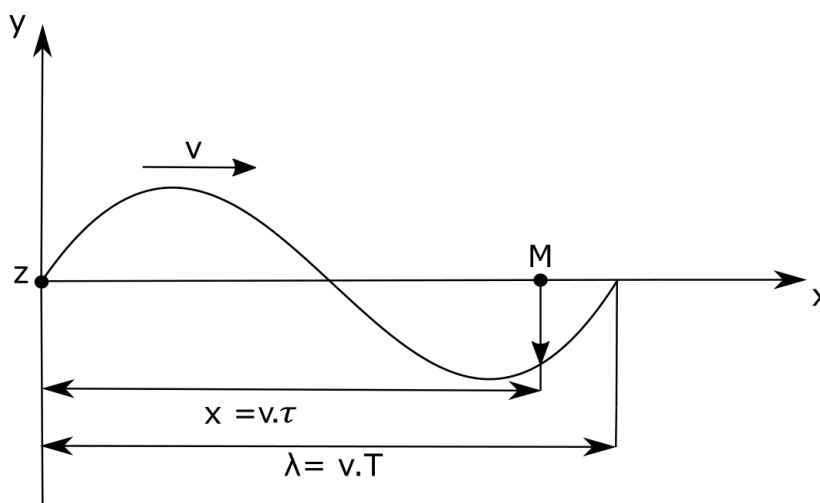
Vztah upravíme dosazením

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad \lambda = v \cdot T. \quad (2.4)$$

Nyní dostaneme rovnici postupné vlny pro řadu bodů

$$y = y_m \cdot \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right). \quad (2.5)$$

Tato rovnice platí pro podélnou i příčnou postupnou vlnu viz [18].



Obr. 2 Podélné vlnění.

Z ... zdroj vlnění

$\lambda$  ... vlnová délka

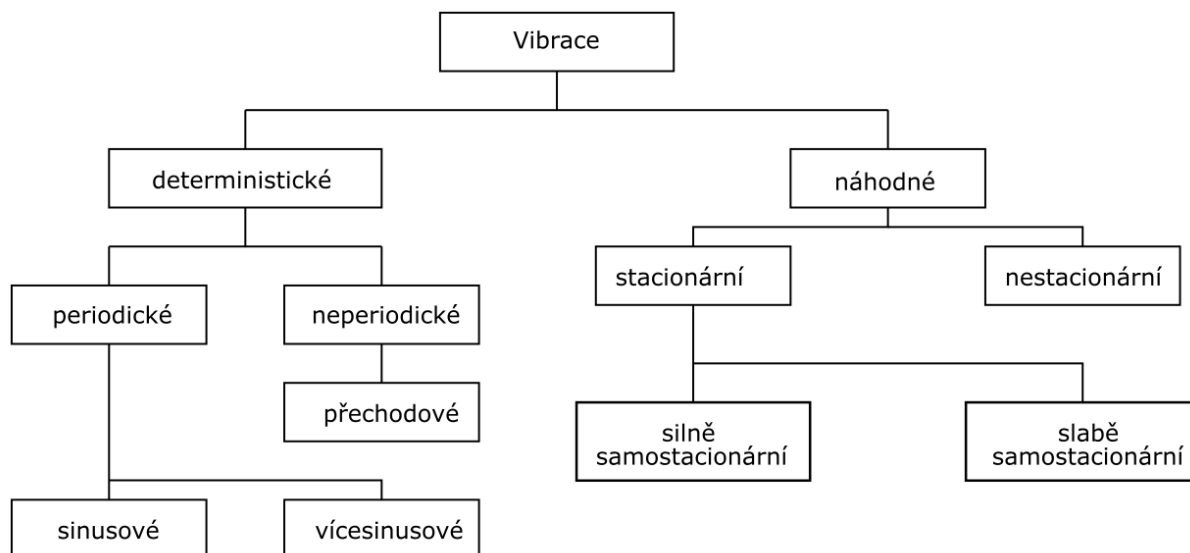
$v$  ... rychlost šíření vlnění

$\tau$  ... doba, za kterou dospěje vlnění do bodu M

Hledáme vztah pro okamžitou výchylku bodu M vlnícího se prostředí

## 2.2 Druhy vibrací

Velikost vibrací může být vyjádřena výchylkou, nebo jejími časovými derivacemi tzn. rychlostí, zrychlením, nebo vektorem udávajícím časovou derivaci zrychlení. Vibrace rozdělujeme do dvou základních skupin zobrazených na Obr. 3, viz [1], které jsou rozděleny dle časového průběhu.



Obr. 3 Rozdělení vibrací.

Deterministické vibrace jsou charakterizovány jako vibrace, u kterých je okamžitá hodnota vibrací v čase určená přesně jejich časovým průběhem dříve, než nastane daný časový okamžik, viz [8].

Periodické vibrace jsou vibrace, které konají harmonický pohyb. Tento pohyb je v závislosti výchylky na čase charakterizován sinusovou křivkou. Tato křivka se vykonává s konstantní periodou, frekvencí a amplitudou (max. výchylka). Neperiodické vibrace tedy nabývají různé amplitudy a nemají konstantní periodu ani frekvenci, viz [19].

Vibrace nazývané náhodné jsou takové, při nichž nemůže být okamžitá hodnota určena z jejich časového průběhu. Jsou to tedy vibrace, které nabývají vždy různé hodnoty a nelze je vyjádřit funkcí, tudíž hovoříme o neperiodických vibracích, viz [19].

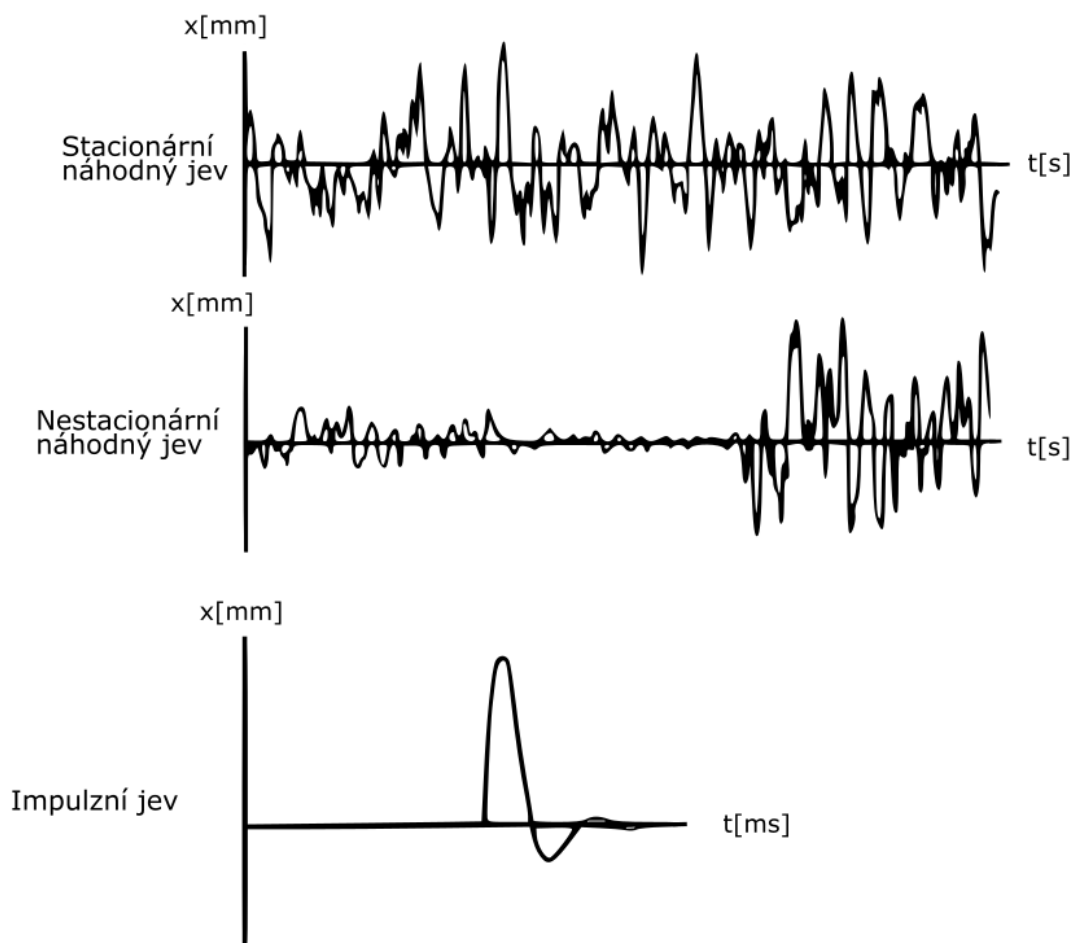
Stacionární, nemění statické charakteristiky se změnou v čase. Pro vytvoření statické charakteristiky musíme použít matematickou statistiku, díky které můžeme získat částečnou představu jak daný děj nebo jev bude vypadat (např. střední hodnota). Pokud jsou tyto charakteristiky konstantní nebo se v čase mění velice málo, hovoříme o stacionárních vibracích, viz [19].

V praxi se pro popis stacionární náhodné vibrace musí použít pravděpodobnost. Ta nám udává pravděpodobnou hodnotu výchylky.

Nestacionární mění svou výchylku velmi prudce v čase. Pokud by bylo použito stejné vyhodnocení jako u vibrací stacionárních, došlo by k neodpovídající hodnotě pro určité pásmo signálu. Lze využít dvou metod, metodu složeného průměru a metodu časového průměrování. První zmíněná metoda je vhodná pro měření, která lze opakovat mnohokrát, a naměřené hodnoty se průměrují. Pokud máme omezený počet opakování, využijeme druhou zmiňovanou metodu. Časové průměrování bere pouze část změřeného úseku a ten zprůměruje. Tyto úseky bývají krátké a vyhodnocují se zvlášť.

Speciální skupinou jsou mechanické rázy, které jsou dány náhlou změnou síly, polohy, rychlosti nebo zrychlení a vybudí v soustavě přechodové vzruchy. Při působení těchto vibrací na člověka spíše než o rázech, hovoříme o otřesech lidského organismu. Pro vyhodnocení rázů nás hlavně zajímá maximální výchylka a rychlost útlumu. V porovnání s nestacionárními vibracemi je zpracování hodnot rázů podstatně jednodušší.

Průběhy náhodných vibrací, pokud jsou pominuty obecně známé sinusové a složené sinusové jevy, pak nejčastější jsou stacionární náhodné, nestacionární náhodné jevy a pulzy, zobrazeno na Obr. 4, viz[10].



Obr. 4 Stacionární, Nestacionární a impulzní jev.

## 2.3 Seismicita

Seismicitu lze rozdělit do tří skupin podle zdroje vzniku, a to na seismicitu přírodní, seismicitu indukovanou a seismicitu technickou, viz[5].

### 2.3.1 Přírodní seismicita



Přírodní seismicita vzniká náhlým uvolněním energie v zemské kůře nebo ve vrchní vrstvě zemského pláště. Hloubka zemské kůry do 40km a pláště do 700km. Pohyb tektonických desek vytváří deformační energii, která může za vznik až 90 % případu zemětřesení. Dalším zdrojem může být, řízení stropu v podzemí, následkem vzniká kinetická energie (přibližně 3 %). Dalším případ vzniku zemětřesení je energie pocházející ze sopečné činnosti (přibližně 7 %). Důsledkem těchto energií jsou silné otřesy, při nichž dochází k trhlinám a zlomům zemské kůry, pohyb mořského dna může vyvolat přílivové vlny, známe jako - *tsunami*. Rozsah závisí na síle zemětřesení a pohybuje se tedy v rozmezí kilometrů až desítek kilometrů.

### 2.3.2 Technická seismicita

Se vznikem technické seismicity je spojená lidská činnost. Charakter záznamu v čase se liší zdrojem. Může se jednat o seismický impuls, který se rychle tlumí nebo rázový či kontinuální projev, trvající po delší dobu. Technické otřesy jsou určeny intenzitou a charakterem na nichž má vliv oblast a její geologické poměry. Pokud se jedná o trhací práce, vyskytuje se zde více faktorů. Velikostí nálože, druh odstřelu, geometrie odstřelu, typ horniny, která přenáší otřesy. V případě dopravních prostředků se jedná o automobily, vlaky (jejich hmotnost, rychlost). Seismické zatížení a jeho hodnocení se nejprve provádělo s cílem předejít poškození objektu. Vyhodnocení prováděné dnes se zaměřuje na pravděpodobnostní přístup. Tento přístup na základě vyhodnocených reálných dat předpovídá pravděpodobnost, že v blízké době může dojít k poškození monitorovaného objektu. Úkolem je tedy zjistit bezpečné meze otřesů, aby nedocházelo k poškození objektu. Podrobnější informace o problematice technické seismicity naleznete v [5].

### 2.3.3 Indukovaná seismicita

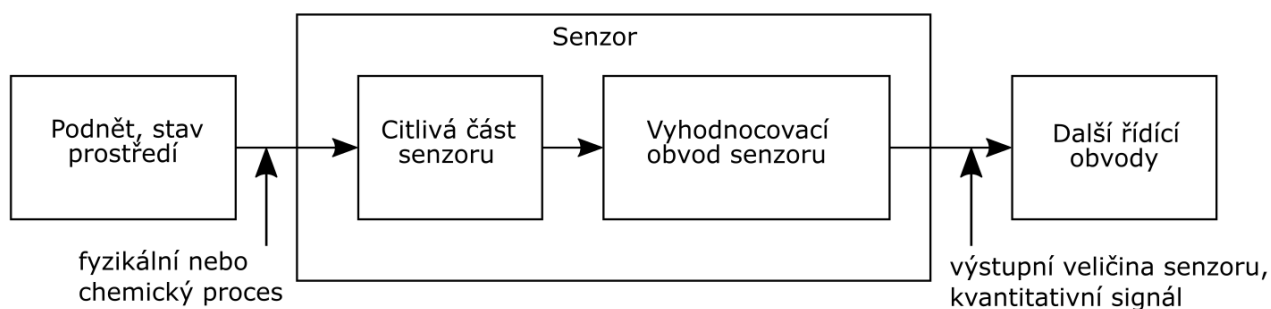
Seismicita indukovaná vzniká tehdy, když dojde k přerozdělení statických tlaků na zemském povrchu nebo přerozdělení dynamických tlaků zemské kůry. Hlavním důvodem jsou důlní činnosti například těžba uhlí, nerostných surovin. Také zatížení zemského povrchu (přehrady, velké výsypky, letiště). Při těchto dějích dochází k uvolnění menší energie než u seismicity přírodní, tudíž má menší dosah.

## 3 Senzory a měření

### 3.1 Senzor

Senzor je zařízení, které slouží ke snímání libovolné fyzikální veličiny a tuto veličinu transformuje tak, abychom sní, dokázali snáze pracovat. Tedy vstupní veličinu transformuje fyzikálním převodem na veličinu výstupní. Sledovanou veličinu snímá citlivá část senzoru známa také jako čidlo, a tuto veličinu vyhodnocuje vyhodnocovací obvod senzoru. Výstupní signál z vyhodnocovacího obvodu senzoru většinou požadujeme elektrický, protože jej lze lépe zpracovávat následujícími obvody. Pro představu měříme teplotu, snímač teploty převádí teplo na odpor, tento odpor je zařazen ve vyhodnocovacím obvodu, kterým je odporový můstek a jeho výstupem je elektrická veličina.

Na Obr. 5 je uvedeno zjednodušené blokové schéma senzoru, které obsahuje čtyři základní bloky, viz[15]. První blok představuje fyzikální nebo chemický proces. Druhý a třetí blok představuje senzor, který se skládá s citlivé části senzoru a vyhodnocovacího obvodu. Čtvrtý blok obsahuje další řídicí obvody pro zpracování výstupu ze senzoru.



Obr. 5 Blokové schéma senzoru.

### 3.2 Měření technických otřesu a vibrací

Vrtání a odstřely patří k nejběžnějším používaným metodám těžby pro důlní a inženýrské stavitelství. Odstřely hornin mají za následek zemní rázy a vibrace, které mohou způsobit poškození okolních struktur, jako jsou budovy, mosty, přehrady, tunely. Měření těchto technických vibrací se snažíme zajistit, aby nedocházelo k překročení úrovně vibrací, které mohou vést ke zmiňovaným poškozením. Sledujeme otřesy, které vyvolají dominantní frekvence. Tyto frekvence se porovnávají s dynamickým výpočtem. Pomocí dynamického výpočtu, hledáme vlastní frekvence konstrukce. Poté se zkoumá, zda se frekvence neblíží, aby nedocházelo k rezonanci konstrukce a nadměrnému zatížení.

### 3.3 Rozdělení seismických vln

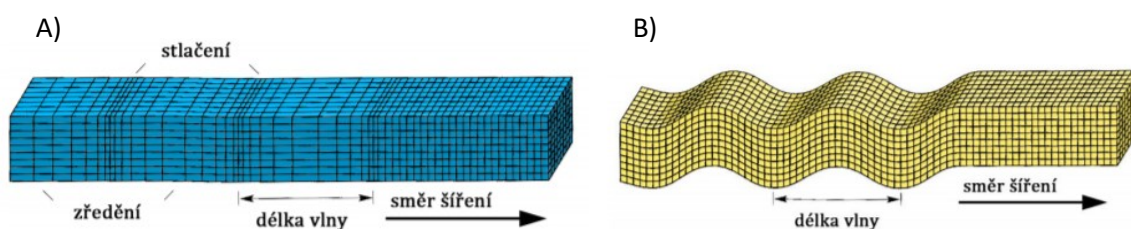
Seismická vlna je kmitání, dochází při ní k přenosu energie a šíří se vibracemi částic bez látkového přenosu. Seismickou vlnu můžeme popsat vlnovou délkou-  $\lambda$  (vzdálenost dvou nejbližších maxim nebo minim), amplitudou –  $A$  (maximální výchylka částice od rovnovážné polohy), frekvencí –  $f$  (počet

opakování kmitu, které vykoná vlna za sekundu), rychlost šíření seismických vln –  $v$  (pokud se šíří v horninách záleží na mineralogickém složení).

### Rozdělení seismických vln

Vlny dělíme podle deformace na povrchové a objemové, viz [5],[6].

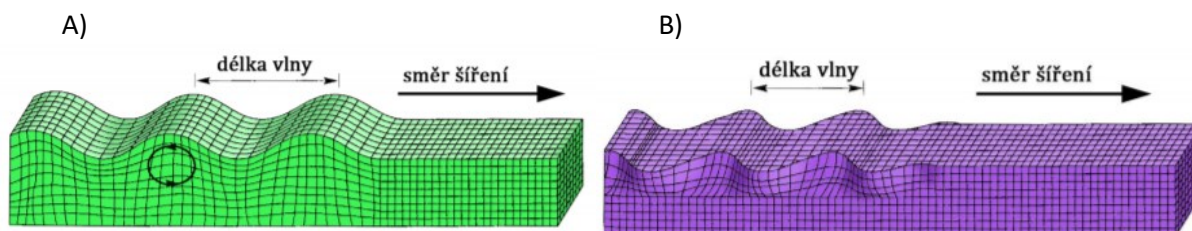
**Objemové si ještě rozdělíme na:** podélné vlny (primární, P-vlny) vidíme na Obr. 6 A) a příčné vlny (sekundární, smykové, S-vlny) na Obr. 6 B), viz [6]. Rozdíl mezi podélnými a příčnými vlnami je ve směru kmitání částic, u podélných kmitají ve směru šíření vlny, zatímco u příčné kmitají kolmo. Další rozdíl je v rychlosti šíření částic kde podélné vlny dosahují značně vyšších rychlostí, ale pokud se zaměříme na účinek, na povrchové objekty u příčných je naopak větší než u podélných, viz [5],[6].



Obr. 6 Objemová deformace způsobená podélnými vlnami A), a příčnými vlnami B).

**Povrchové:** Rayleighovy vlny (R-vlny), Loveho vlny (L-vlny)

**Rayleighovy vlny** vznikají pouze na rozhraní prostředí Obr. 7 A). Pohyb částic je kmitání ve vertikální rovině po eliptické trajektorii. Vznikají kombinací podélné vlny a příčné vlny kmitající ve vertikální rovině. Povrchové vlny při šíření dosahují nižší rychlosti oproti vlnám objemovým, ale zase dosahují větší amplitudy a pro nadzemní objekty představují velmi velké riziko poškození, viz[5],[6].



Obr. 7 Povrchová deformace způsobená Rayleighovými vlnami A), a Loveho vlnami B).

### Loveho vlny

Vlny se šíří v horizontální rovině a částice prostředí kmitají kolmo na směr šíření Obr. 7 B). Rychlosti Loveho vln dosahují ještě vyšších rychlostí, než Rayleighovy vlny a pro nadzemní objekty, představují největší riziko poškození, viz[6].

## 3.4 Posuzování stavebních objektů

Dle ČSN 73 0040 se hodnotí zatížení stavebních objektů technickou seismicitou a jejich odezvou. Platí pro stanovení zatížení a odezvy konstrukcí vzniklé technickou seismicitou, pro pozemní a inženýrské stavby v oblastech s výskytem technických otřesů na území ČR.

Technická seismicita se hodnotí podle naměřené efektivní rychlosti v referenčním místě měření. Mezní hodnoty efektivní rychlosti  $v_{ef}(mm.s^{-1})$  jsou uvedeny v Tab. 1. Struktury budov se dělí podle třídy významnosti a odolnosti objektů.

Pokud jsou na referenčním stanovišti naměřeny menší hodnoty, než uvedené v Tab. 1 není potřeba z hlediska mezního stavu únosnosti dále posuzovat konstrukci.

Vodorovná osa tabulek určuje třídy významu objektu a dělí se na čtyři základní a to třídy U, I, II, III. Třída U jsou objekty s mimořádným ekonomickým a společenským významem (elektrárny, historické památky). Třída I jsou objekty s velkým ekonomickým a společenským významem (továrny, dálnice). Třída II jsou objekty se středním ekonomickým a společenským významem (kravín, chalupy). Třída III jsou objekty omezeného ekonomického a společenského významu (sklady, sloupy elektrického vedení).

Vertikální osa tabulek reprezentuje třídy odolnosti objektu. Ve třídě A se nacházejí objekty nejvíce náchylné k poškození. Jsou to zejména historické památky, které neodpovídají dnešním stavebním předpisům. Ve třídě B se nacházejí běžné cihelné stavby nejvýše 3 podlaží. Do třídy C se řadí velké budovy z cihel a tvárnic, kamenné mosty. Třída D jsou budovy z ocelové nebo dřevěné konstrukce, opěry mostů z kamene. Do třídy E jsou zařazeny železobetonové a ocelové konstrukce. V třídě F se nacházejí nejvíce odolné objekty železobetonové a ocelové ostění, tunely, civilní úkryty.

Tab. 1: *Efektivní rychlosti kmitání.*

Třída odolnosti objektu	$v_{ef}(mm.s^{-1})$ Třída významu objektu			
	U	I	II	III
A	0,2	0,4	0,7	1,1
B	0,4	0,6	1,0	1,8
C	0,7	1,5	2,0	2,8
D	0,9	2,0	2,5	3,5
E	1,1	2,5	3,0	4,0
F	1,5	3,0	4,0	5,0

Tab. 2: *Efektivní rychlosti kmitání.*

Třída odolnosti objektu	$v_{ef}(Mcmt.s^{-1})$ Třída významu objektu			
	U	I	II	III
A	6,72E+ 10	1,34E+ 11	2,35E+ 11	3,70E+ 11
B	1,34E+ 11	2,02E+ 11	3,36E+ 11	6,05E+ 11
C	2,35E+ 11	5,04E+ 11	6,72E+ 11	9,41E+ 11
D	3,03E+ 11	6,72E+ 11	8,40E+ 11	1,18E+ 12
E	3,70E+ 11	8,40E+ 11	1,01E+ 12	1,34E+ 12
F	5,04E+ 11	1,01E+ 12	1,34E+ 12	1,68E+ 12

1Mcmt= 2,98E-12 ( $mm.s^{-1}$ )

### 3.5 Požadavky na vibrační snímače

Během měření otřesů a vibrací musíme splňovat určité požadavky. Hlavním požadavkem je, aby časový průběh mechanické kmitání byl co nejpřesněji zaznamenán, a aby výstupní signál ze snímače vibrací odpovídal časovému průběhu mechanického kmitání. Pro měření vibrací a otřesu je ideální co nejširší kmitočtový rozsah a to od stejnosměrné hodnoty do nekonečna. Pokud dochází k zúžení kmitočtového rozsahu, vzniká chyba měření, která se přičítá k dalším chybám, které jsou způsobeny (nepřesností kalibrace, nelinearitou snímače a měřicího systému) a proto se požadovaný kmitočtový rozsah vztahuje k odhadované chybě měření.

## 4 Snímače rychlosti

### 4.1 Seismografy

Seismografy jsou přístroje, zaznamenávající seismické signály neboli pohyby půdy, které jsou vyvolané seismickými zdroji a to přirozenými nebo umělými (zemětřesení, odstřely v dolech, sopečné aktivity apod.) Vývojem a zlepšováním seismografu a měřicí techniky se zbývá seismometrie viz [16]. Základní prvky moderního seismografu jsou seismometr a seismogram. Seismometr obsahuje příslušné elektronické obvody. Seismogramem se označuje analogové nebo digitální zařízení pro záznam. Analogový záznam se od digitálního liší hlavně v zápisu informace, analogový používá souvislé stopy zápisu například ručičkou na papírový pás, zatímco digitální zapisují pouze číselné hodnoty časových vzorků analogového signálu a ukládají je přímo na pevný disk nebo CD. Seismografy lze rozdělit do čtyř základních skupin podle schopnosti zachycení kmitočtového pásma seismických signálů a to na krátkoperiodické (konvenční označení SP), dlouhoperiodické (LP), širokopásmové (BB), velmi širokopásmové (VBB).

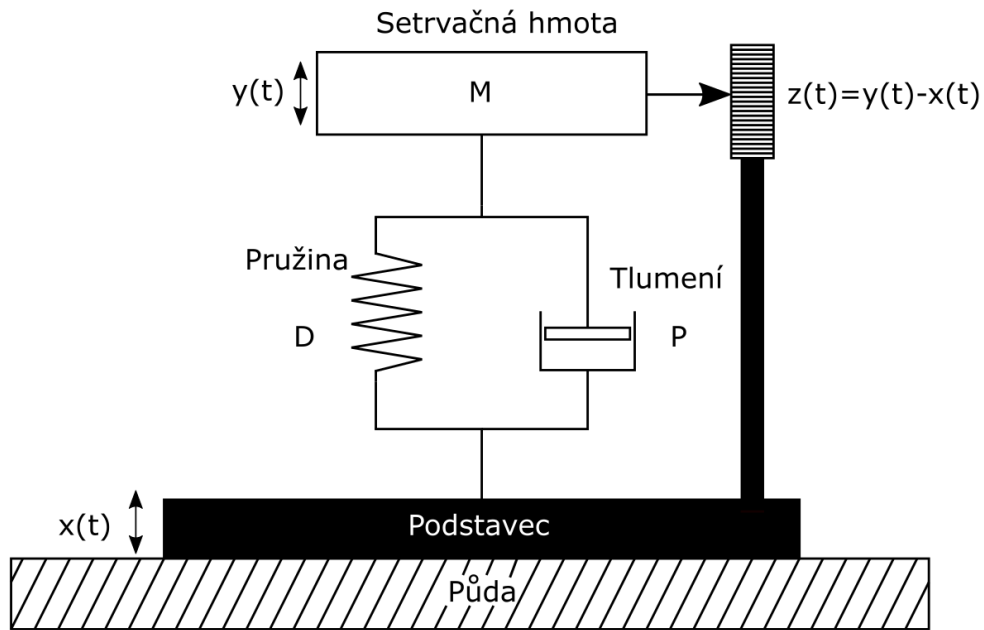
### 4.2 Seismometry

Snímače, pro měření zrychlení hmotného bodu nazýváme seismometry, jsou to elektromechanické zařízení, zachycují pohyb půdy a definovaným způsobem ho převádí na elektrický signál.

Měření pohybu půdy můžeme provádět dvěma principy, prvním principem je relativní posunutí mezi dvěma body (tyto přístroje nazýváme strainmetry), nebo jako relativní pohyb půdy vůči volně s ní spřažené setrvačné hmotě (tyto přístroje nazýváme setrvačné seismometry). Přenosné snímače používané pro terénní měření nazýváme geofony, většinou pracují na principu setrvačných seismometru.

### 4.3 Setrvačný seismometr

Setrvačný seismometr si nejjednodušeji můžeme představit jako tlumený mechanický kmitavý systém, pro vysvětlení závislosti výstupního signálu na pohybu půdy zavádíme pohybovou rovnici. Obrázek 8 nám poslouží, jako model pro popis pohybové rovnice viz [16].



Obr. 8 Tlumený vertikální oscilátor.

Při vibraci půdy  $x(t)$  se vibrace přenáší na podstavec. Setrvačná hmota  $M$  se snaží udržet klidovou polohu, tudíž vznikne pohyb půdy vůči setrvačné hmotě,  $z(t) = y(t) - x(t)$ . Pružina vyvine sílu úměrnou  $z(t)$ , tlumící zařízení vyvine protisílu úměrnou rychlosti neboli první derivaci tohoto pohybu  $\dot{z}(t)$ . Konstanty označíme písmeny, tuhost pružiny označíme jako  $D$  a třecí sílu  $P$ . Setrvačná síla tuhého tělesa je dána součinem jeho hmoty a zrychlení, podle pohybové věty tato síla musí být rovná součtu všech sil. Ekvivalentem účinku pohybu půdy  $x(t)$  na setrvačnou hmotu je vnější síla  $-M\ddot{x}(t)$ . Takže platí

$$M\ddot{z}(t) = -Dz(t) - P\dot{z}(t) - M\ddot{x}(t). \quad (4.1)$$

Pokud požadujeme pohyb převést na elektrický signál, použijeme jednoduchý měnič. Cívka se pohybuje mezi póly permanentního magnetu, tento elektrodynamický měnič má výstupní napětí úměrné rychlosti relativních pohybů ale s opačným znaménkem.

$$e(t) = -G\dot{z}(t). \quad (4.2)$$

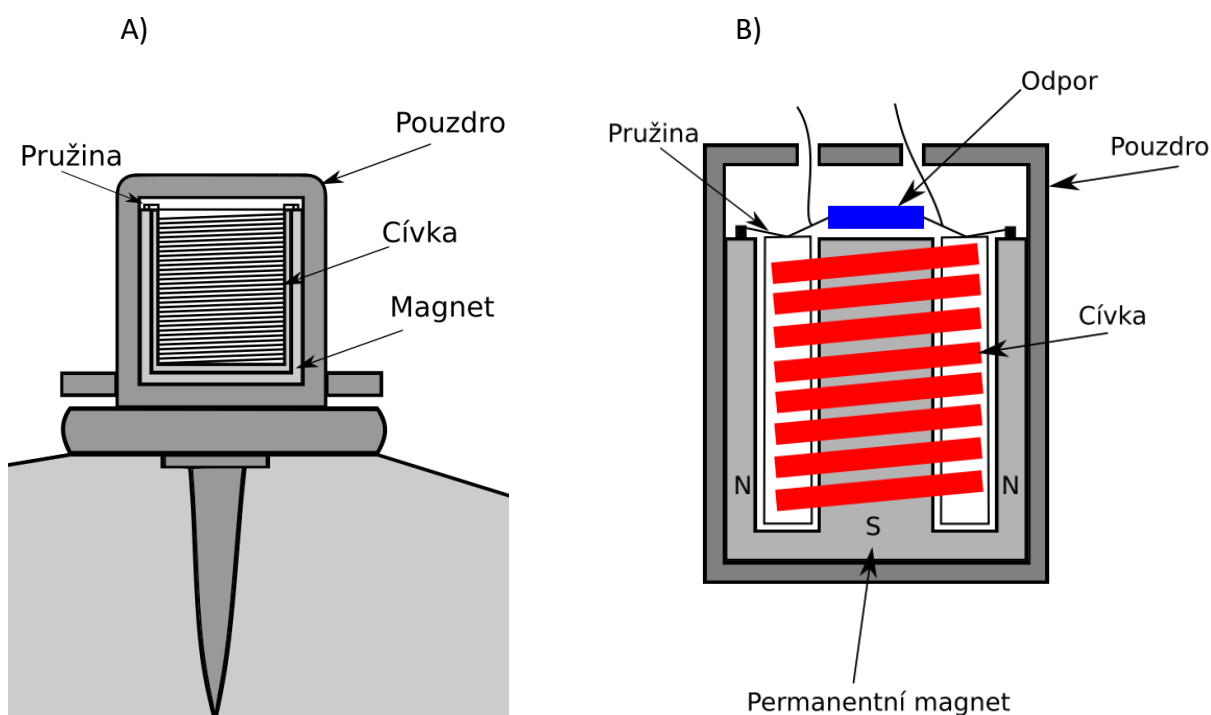
Kde  $G$ - elektrodynamická konstanta.

## 4.4 Geofony

Geofon pracuje na stejném principu jako moderní seismometr, ale jeho konstrukce je výrazně miniaturizovaná. Zaznamenává mechanické vibrace média ve frekvenčním rozsahu od 1 Hz pro nízkofrekvenční geofony, a do 1kHz pro vysokofrekvenční geofony. Většina používaných geofonů má přirozenou frekvenci 4,5 Hz až 40 Hz. Maximální frekvence se pohybuje mezi 150 Hz až 400 Hz. Geofony

jsou schopny zaznamenat amplitudu a rychlost vibrací okolních částic v rozmezí 0,00025 mm/s až 25 mm/s. Konstrukce geofonu je provedena tak, že pohyb jeho vibračního systému probíhá v jednom směru a v důsledku toho je amplitudová odezva orientovaná podél jedné složky oscilační rychlosti. Při záznamu plné vlny se používají 3-stupňové geofony. V jednom pouzdro geofonu jsou umístěny tři geofony orientované v ortogonálním systému.

Standardní geofon je tvořen základními prvky: pouzdro, setrvačná hmota, magnet, pružina a hrot Obr. 9 A). Kryt poskytuje ochranu elektronických součástek před vnějšími vlivy, jako je vlhkost nebo prach. Prvek spojující kryt se zemí by měl dosahovat co nejlepší příjem mechanické energie. Používají se např. kovové desky, kovové kostky, kotvy, expanzní sondy, nebo různé způsoby lepení.



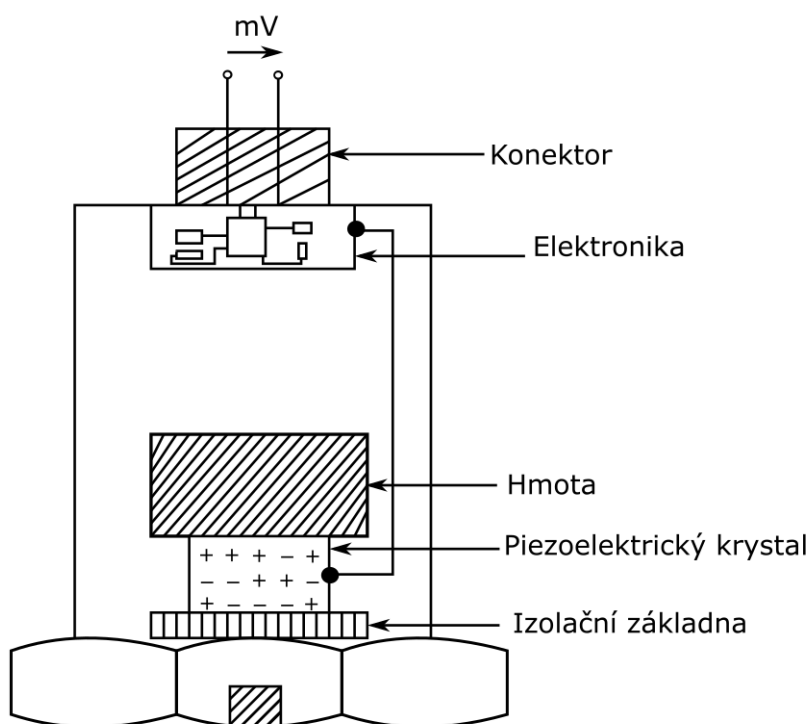
Obr. 9 Konstrukce geofonu.

Mechanická konstrukce geofonu může být provedená dvěma způsoby, a to s pohyblivou cívkou nebo pohyblivým magnetem. Ve standardním provedení je setrvačnou hmotou cívka navinutá na jádro Obr. 9 B). Cívka je uchycená přes pružiny k pouzdro, což ji umožňuje relativní pohyb a je umístěná v permanentním poli magnetu. V případě, že pouzdro začne vibrovat, dojde k pohybu magnetu s ním, zatímco cívka vykonává relativní pohyb vzhledem k pouzdro. V důsledku tohoto pohybu je mezi konci cívky generováno napětí úměrné rychlosti pohybu cívky v magnetickém poli a současně k rychlosti pohybu částic média. Ke správnému fungování geofonů je zapotřebí útlum, ke zkrácení doby volných vibrací interní hmoty a omezení amplitudy přirozených vibrací. Správné tlumení způsobuje, že jsou eliminovány vlastní vibrace geofonu. K tomuto účelu je využíván účinek elektromagnetického potlačení spojeného s indukčními proudy v cívce, vytvořeného během jeho pohybu. Za účelem zvýšení útlumu se běžně používá zkratový odpor, který je zodpovědný za omezení proudu protékajícího cívkou.



## 4.5 Snímače zrychlení – akcelerometry

Akcelerometry neboli snímače zrychlení se používají k měření vibrací, které přeměňují vstupní zrychlení na výstup, nejčastěji v podobě elektrického signálu, který je úměrný vstupnímu zrychlení [14]. Akcelerometry dnes patří k nejpoužívanějším snímačům a jeho konstrukci vidíme na Obr. 10, viz [13]. Základní rozdělení akcelerometru je na piezoelektrické, piezorezistivní a kapacitní.



Obr. 10 Konstrukce akcelerometru.

### 4.5.1 Piezoelektrický akcelerometr

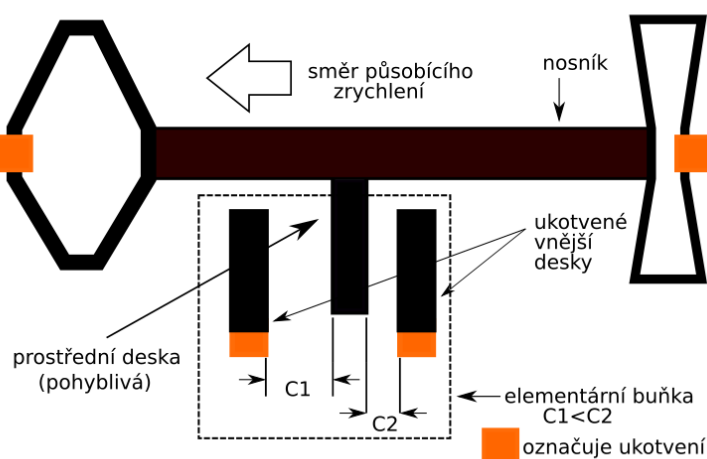
Základem těchto akcelerometrů je piezoelektrický materiál a seismická hmota. Piezoelektrický materiál reprezentuje piezoelektrický krystal, který je citlivý na deformace. Na základně je umístěn převodník zrychlení, jakmile začne působit zrychlení, vznikne síla, která začne vyvíjet sílu na piezoelektrický krystal. Deformace způsobí vygenerování elektrického náboje, jenž je úměrný mechanickému namáhání způsobeného vibracemi. Velikost náboje piezoelektrického materiálu lze změřit dvěma způsoby. Přímou externí elektronikou s vysokou vstupní impedancí nebo se častěji využívá vnitřní elektronika akcelerometru, s funkcí převádění náboje na napěťový výstup, s nízkou impedancí. Vzhledem k jednoduchosti konstrukce senzoru lze použít také jednoduché vyhodnocovací obvody. Tento akcelerometr nedokáže měřit frekvenci nižší než 0,1 Hz. Zásadním rozdílem jednotlivých typů akcelerometrů je směr působení deformace vůči ose. Tomu musí být přizpůsobená konstrukce, resp. vzájemné uspořádání piezoelektrického snímače, hmoty a pouzdra. Nejčastější je rozlišujeme na smykové, ohybné a kompresní viz [20].

#### 4.5.2 Piezorezistivní akcelerometr

Elementárním rozdílem oproti piezoelektrickému akcelerometru je ve využití krystalu. Piezorezistivní akcelerometr využívá piezokeramiku (piezorezistivní materiál), který vlivem působení zrychlení (síly) namáhá mechanicky piezokeramiku, která mění svůj odpor. Důkladnější informace ohledně konstrukce a principu můžete dohledat v [20]. Ve srovnání s piezoelektrickými akcelerometry lze měřit i konstantní zrychlení tj. frekvenci změn od 0 Hz. Mechanické napětí se převádí na změnu odporu, kterou můžeme snadno změřit jako úbytky elektrického napětí. K měření odporu piezomateriálu je vhodné zapojení základního nebo polovičního Wheatstonva můstku. Výstup s jednoduchou konstrukcí umožňuje senzoru, napojení na vyhodnocovací obvod. Lze měřit stálou akceleraci a další výhodou je velká citlivost. Nevýhodou je výstup, který je významně závislý na teplotě.

#### 4.5.3 Kapacitní akcelerometry

Princip činnosti je uveden na obr. 11, viz [21]. Kapacitní akcelerometry mění vzdálenost ploch kondenzátoru posunem od středové desky. Výstupní signál je měnící se kapacita. Středové desky jsou symetricky uspořádány a umístěny mezi dvojicí vodivých elektrod a dohromady vytvářejí kapacitní dělič. Pokud nepůsobí žádná vnější síla, obě kapacity jsou téměř stejné a na středové desce bude 0V. V případě kdy začne působit zrychlení, dojde k vychýlení středové desky směrem blíže k jedné z elektrod a kapacita kondenzátoru se změní. Na středové desce můžeme změřit změnu napětí. Pro měření malých dynamických rozsahů zrychlení jsou vhodné kapacitní akcelerometry, které jsou velmi citlivé a přesné. Další druhy akcelerometrů nalezneme v [20].



Obr. 11 Konstrukce kapacitního akcelerometru.

#### 4.5.4 Použití akcelerometrů

Široká možnost použití akcelerometru. Například senzory pro airbag, měření vibrací, měření detekce a pohybu rychlosti, měření a detekce seismické aktivity, detekce pádu, měření odstředivé síly a zrychlení, mobilní telefony. Pro seismické měření a měření vibrací budov.

### 4.6 Senzory vyvinuté VŠB-TUO

Senzory pro experimentální měření vyvinuté VŠB-TUO již byly testovány u dvou případů. První měření se zaměřilo na zhutňující práce při stavbě obchvatu a použití interferometrického senzoru.

Druhé měření se zaměřilo na trhací práce při výstavbě kanalizačního kolektoru a byl použit jak interferometrický senzor, tak i senzor akustický. Cílem těchto experimentů je dokázat, že i systémy pracující na jiném fyzikálním principu (než dosud používaném), mají velký potenciál nahradit stávající seismická zařízení, která jsou finančně nákladná.

### 4.7 Interferometrický senzor - zhutňování

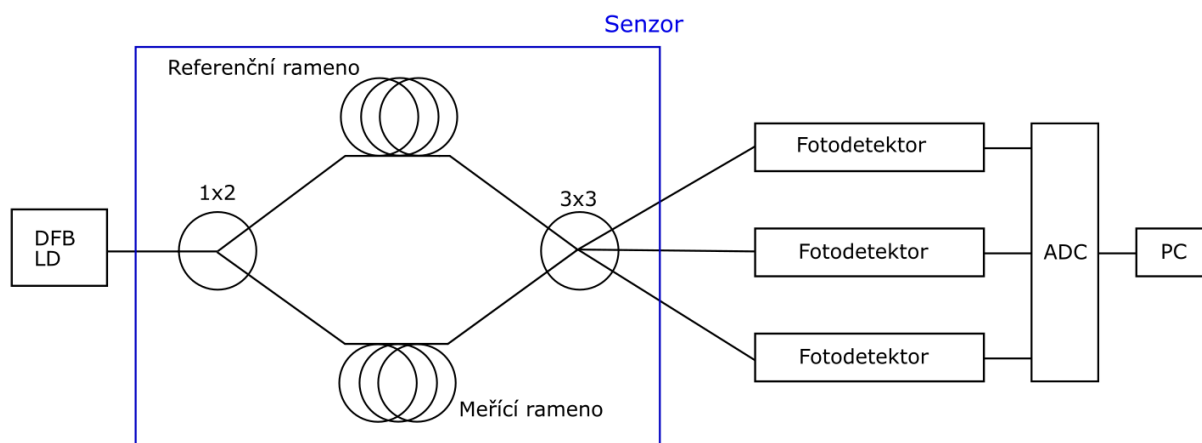
Základním úkolem v současné době je výstavba dopravní infrastruktury. Stavba nových obchvatů měst, oprava dosavadních silnic, které jsou poškozeny zejména působením dopravní a nákladní přepravy. Dochází tedy k novým výstavbám a opravám a je vždy žádoucí zvolit správnou metodu k úpravě podloží. Jednou z nejvíce používaných metod pro úpravu půdy je zhutňování pomocí vibračních válců. Metoda je výrazně výhodnější jak z hlediska výsledků tak i malým finančním nárokům v porovnání s jinými metodami. Během zhutňování půdy touto metodou se vibrace šíří do okolního horninového prostředí, ale intenzita vibrací není tak zřetelná jako v případě jiných metod. Výhoda těchto nízkých vibrací, je možnost využití v městských oblastech, nebo v oblastech s výskytem historických objektů.

Experimentální měření bylo provedeno VŠB-TUO během zhutňujících prací při stavbě obchvatu a úkolem bylo porovnání standardní seismické instrumentace s vyvinutým interferometrickým senzorem pro sledování vibrací, které vznikají v průběhu zhutňování půdy vibračními válci, viz [11].

#### 4.7.1 Princip a konstrukce

Interferometrický senzor (optický senzor), a jeho konstrukční schéma vidíme na Obr. 12, viz [11]. Byl vyvinut pro experimentální měření, pracuje na principu spojení dvou nebo více zdrojů světla, které vytvářejí interferenční obrazec. Tento obrazec lze měřit a analyzovat. Pro měření malých změn světla, je interferometr vhodnou volbou, jinak není, možné tyto malé změny měřit. V první části bylo světlo rozděleno na dvě části rozdělovačem 1 x 2. Rozdělením světla na dvě části byl, vznik dvou cest. První cesta se nazývá referenční rameno a druhá měřicí rameno. Aby byl interferometr vyvážený, optická délka obou cest byla změřena, a dosahovala téměř totožné hodnoty, tedy interferometr byl vyvážený. Ramena interferometru byla tvořena optickým vláknem o délce 3m. Výstup z obou ramen byl připojen ke vstupům 3 x 3 vazebního členu, toto zapojení nám tvořilo senzor. Zdroj světla zajišťovala laserová dioda (LD) s distribuovanou zpětnou vazbou (DFB) s distribucí 1540 nm (DFB). Konstrukce optických

fotodetektoru se skládala z InGaAs p-i-n pigtailovaných fotodiod plus zesilovací elektrické obvody. Pro změnu analogového signálu na digitální, bylo použito National Instruments 9239 v modelu cDAQ-9171. Digitální signál byl předán přes USB do počítače, ve kterém byla spuštěna aplikace LabWIEV, ke shromáždění dat.



Obr. 12 Schéma interferometrických měření. DFB, distribuovaná zpětná vazba.

Senzor byl vložen do plastové krabíčky s jedním vstupem a třemi výstupními konektory. Celá krabice rozměru  $45 \times 35 \times 17$  cm, byla nalepená na skleněnou základnu  $50 \times 50 \times 1$  cm zobrazeno na Obr. 13, viz [11]. V krabici byl vyřezán otvor, aby bylo možné umístit měřící vlákno přímo na skleněnou základnu. Jako lepidlo byla použita epoxidová pryskyřice z důvodu, že měla podobnou pružnost jako základna. Ovlivněním měřícího vlákna vibracemi, došlo k fázovému zpoždění světla. Aby vibrace neovlivňovaly i referenční vlákno a optické vazební člen, bylo proto vlákno a vazební členy umístěny mezi dvě vrstvy materiálu, který je před vibracemi izoloval (byla použita skleněná vlna). Následovně byla odzkoušena citlivost senzoru, která prokázala citlivost ve frekvenčním rozsahu od 1 do 300 Hz.



Obr. 13 Senzor umístěný v krabici.

#### 4.7.2 Měření

Experimentální měření bylo provedeno při stavbě obchvatu města Krnov v České republice, během výstavby přechodové oblasti pro jeden z mostů. Půdní těleso přechodové oblasti bylo postaveno ve

vrstvách o tloušťce 0,5m. Samotné měření proběhlo při konstrukci dvanácté vrstvy, viz [11]. Vzdálenost umístění senzoru se pohybovala od 1,4 m do 13,5 m. Hmotnost zhutňovacího válce byla 10 880kg. Frekvence vibrací válce lze bylo nastavit na hodnotu 20-36 Hz a amplitudou vibrací 2,04-0,84 mm. Při konečném srovnání interferometrického senzoru a seismické stanice se dospělo k jednoznačným shodám v časové oblasti (v délce individuálních záznamů, i v případě identifikace maxima).

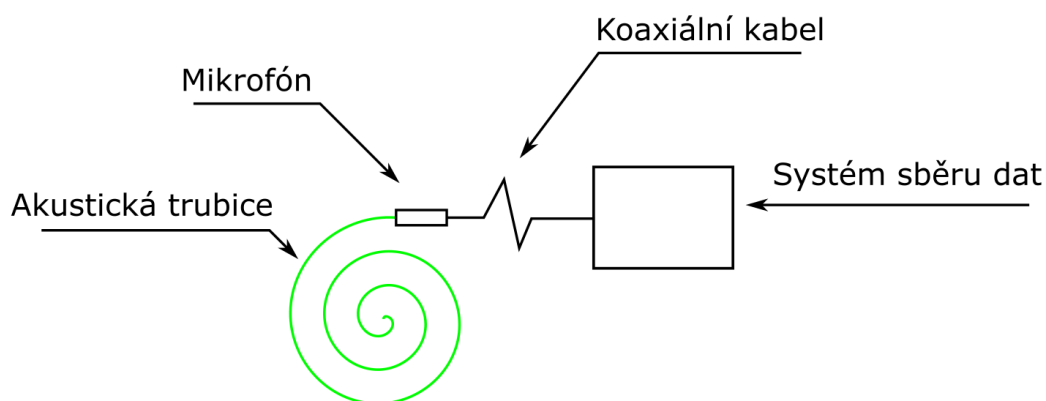
#### 4.8 Interferometrický senzor, akustický senzor – trhací práce

Trhací práce mají za následek vznik vibrací. Monitorováním těchto vibrací se zabývá seismické a geotechnické inženýrství. Během podzemních staveb se provádí cyklické ražení, to znamená, že se střídá vrtání, trhací operace, odtěžení rubaniny a výstužné operace. Pokud se stavby nachází mělce pod povrchem zastavěné oblasti, je nutné monitorovat civilní a občanské budovy, které mohou být ohrožené v důsledku ražeb, nebo samotnými vibracemi. Monitoring se hlavně zaměřuje na amplitudy vibrace a také na obsah a dominantní frekvenci signálu. Ty se mohou lišit v důsledku, o jaký typ horniny se jedná, také na vlastnostech výbušniny a použité technologie trhací operace. Frekvence u trhacích pracích v horninách může nabývat hodnoty frekvence od 1 do 300 Hz, viz [12].

##### 4.8.1 Princip a konstrukce

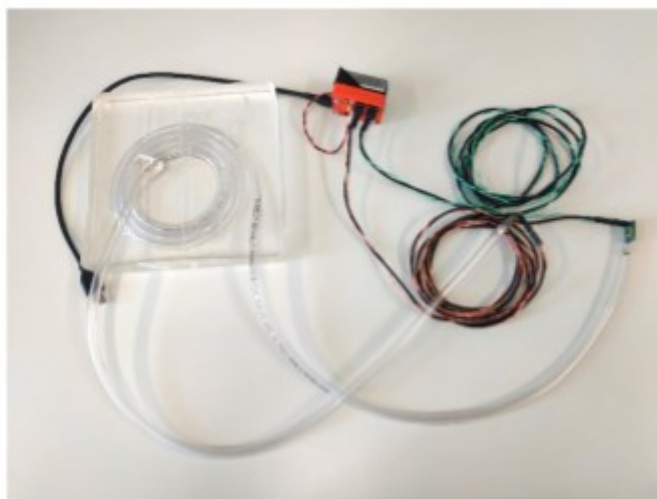
Princip a konstrukce interferometrického senzoru, který byl využit, odpovídá již zmíněnému senzoru, kterým bylo prováděné měření při zhutňování. Tedy princip a konstrukce interferometru nebude znova uváděna.

Akustický senzor pracuje na principu změny vibrací, na změnu akustického tlaku. Akustický tlak se měří pomocí mikrofónu. K sestavení akustického senzoru bylo zapotřebí elektretový mikrofón, nízko šumový operační zesilovač, mikrokontrolérová jednotka, akustická trubice o délce 1,5m a izolační materiál k zapouzďení trubice a jednotlivé komponenty byly zapojeny dle schématu na Obr. 14, viz [12].



Obr. 14 Schéma akustického senzoru.

Trubice byla z jedné strany uzavřena mikrofonem a na druhé straně utěsněna koncovkou, aby nedocházelo k úniku média. Utěsnění zajistí přímý vztah mezi tlakem a objemem plynu v trubici při konstantní teplotě. Plášť elastické trubice se deformuje a mění svůj objem, vlivem působení okolních pohybových částic. Následkem je změna tlaku v trubici, která se za pomoci mikrofonové membrány zaznamenává. Také bylo provedeno měření k ověření tlumících vlastností trubicového senzoru. Mikrofony byly umístěny uvnitř a vně akustické trubice a naměřené hodnoty se pohybovaly kolem 20 až 40 dB pro frekvence do 2,5kHz. Na Obr. 15 je možné vidět reálnou konstrukci nízkonákladového akustického senzoru, viz [12].



Obr. 15 Nízkonákladový akustický senzor.

#### 4.8.2 Měření

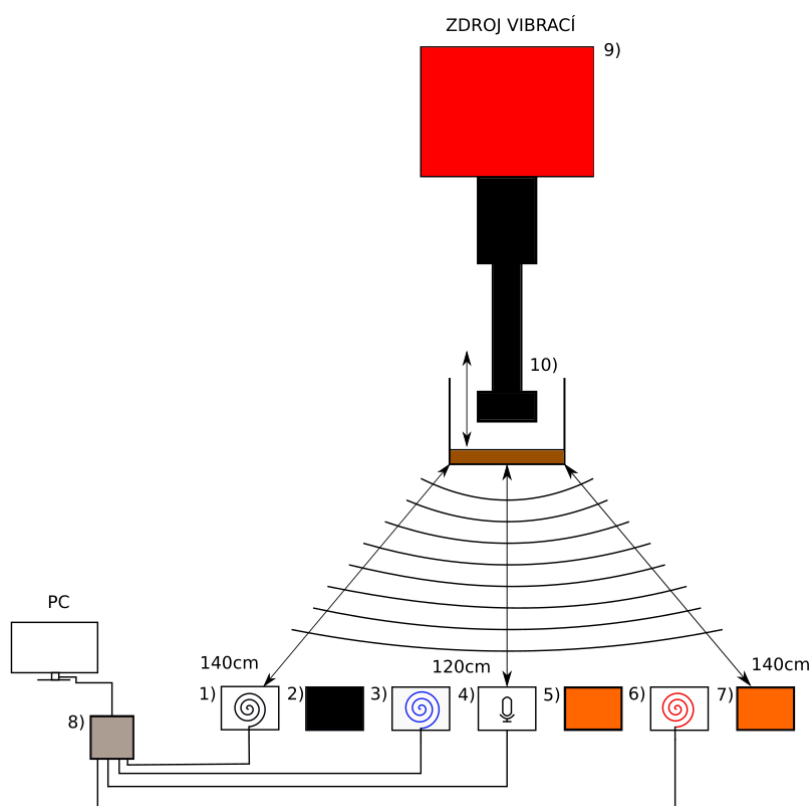
Měření bylo provedeno během trhacích prací při ražbě kanalizačního kolektoru v obci Radvanice. Jednalo se o cyklickou ražbu malého rozsahu. Vzdálenost měřičského stanoviště od prováděné trhací práce se pohybovala od 14 do 61m. Interferometrický senzor a akustický senzor byly umístěny na povrchu země včetně standardního seismického vybavení. Akustický senzor byl umístěn do hloubky 10 cm. Signál se měřil pouze ve vertikální ose. Výstupem z interferometrického senzoru byla fázová odezva ( $^{\circ}$ ), z akustického senzoru akustický tlak (Pa). U seismického vybavení rychlost hmotného bodu (mm / s). Vzhledem k tomu, že byly využity tři typy senzorů, a každý pracoval na jiném fyzikálním principu, bylo nutné data synchronizovat a amplituda byla normalizována tak, aby mohla být použita jediná závislá osa. Vyhodnocení se zaměřilo především na frekvenci a amplitudu signálu. Shoda ve frekvenční doméně byla prokázána jak v spektrálním charakteru, tak i v šířce pásma. V amplitudové doméně došlo ke shodě v charakteru a délce záznamu, viz [12].

## 5 Praktická část

Jak bylo zmíněno v úvodu, praktická část bakalářské práce se zabývá využitím nízkonákladového pneumatického systému pro měření technických otřesů. Tato kapitola bude obsahovat naměřená data, která byla získána experimentálním měřením. Dále jednotlivé použité senzory, popis měření a schéma měření. Zhodnocení přesnosti a citlivosti senzorů. V rámci otestování měření proběhlo v laboratořích na Fakultě stavební VŠB-TUO.

### 5.1 Popis měření se schématy

Měření proběhlo dne 14.2.2020 na Fakultě stavební VŠB-TUO. Plán měření byl následující, otestovat měřicí senzory k měření vibrací vzniklých při úderech bucharu a porovnat naměřená data z námi zvolených senzorů, se standardní seismickou stanicí. Zdrojem vibrací byl buchar, který opakoval počet nastavených úderů, jednalo se o 25 úderů. Jeden úder se opakoval s periodickým časem 1,6s. Pro získání většího počtu vzorků měření se každých 25 úderů opakovalo 8x, v součtu 200 úderu. Buchar generoval úder kládívem, které mělo dvě hmotnosti a to 2,5kg a 4,5kg. Kladivo dopadalo do nádoby, ve které již byla zhutněná zemina. Senzory se po přichystání rozmístily před zdroj vibrací do dvou vzdáleností. Pro první měření byly senzory umístěny do roviny a vzdálenost od středního senzoru byla 120 cm, krajní senzory se nacházely ve vzdálenosti 140cm - Obr. 16.



Obr. 16 Schéma měření pro obě vzdálenosti 120-140 cm, (60)cm.

Před samotným měřením proběhla zkouška 25 úderů a zjišťovalo se, zda je vše správně zapojeno, jestli jednotlivé senzory měří hodnoty, a zdali jsou zapisovány do počítače. Po krátké kontrole se začala měřit první sada dat. Buchar byl vybaven velkým kladivem a vzdálenost jak již bylo zmíněno, byla 120 cm až 140 cm. Po změření 200 úderů bylo kladivo bucharu vyměněno za malé kladivo a měření se opakovalo ve stejné vzdálenosti. Bohužel změna kladiva za malé vedla k narušení struktury zhutněné zeminy v nádobě a kladivo ji začalo vytahovat. V důsledku bylo změřeno pouze 100 úderů. Pokud by měření probíhalo v nezhuťné zemině, vibrace by se šířily odlišně, než při měření na zhutněné zemině a obdržely by se rozdílné výsledky.

Druhá sada dat se měřila na vzdálenost 60 cm Obr. 16. Před samotným měřením bylo kladivo bucharu vyměněno opět za velké a pokusili jsme se zeminu v rámci časových možností znovu zhutnit. Aby jednotlivé senzory byly rozmístěny ve stejné vzdálenosti, byly umístěny do půlkruhu okolo bucharu. Měření na kratší vzdálenost s velkým kladivem mělo tendenci nevytahovat zeminu, ale bohužel od stého úderu došlo k vytahování zeminy a měření se přerušilo. Vzhledem k tomu, že velké kladivo začalo také vytahovat zeminu, měření s malým nebylo realizovatelné.

## 5.2 Popis schématu měření

Schéma na Obr. 16 se liší pouze ve vzdálenosti od zdroje vibrací, ve které byly umístěny senzory. Označeny čísla od 1 do 7 jsou všechny použité měřicí přístroje.

- 1) Nízkonákladový pneumtický senzor (průhledná hadice)
- 2) Seismograf BRS32-25A
- 3) Nízkonákladový pneumtický senzor (průhledná hadice na skle)
- 4) Akustický snímač (mikrofon)
- 5) Seismograf BRS32-37
- 6) Nízkonákladový pneumtický senzor (červená hadice)
- 7) Seismograf BRS32
- 8) National instruments USB-4431
- 9) Zdroj vibrací - buchar
- 10) Kladivo bucharu

Obr. 17 - Fotografie z měření na vzdálenost 60 cm. Příklad - 1) nízkonákladový pneumtický senzor (průhledná hadice), dle schématu úplně vlevo odpovídá reálnému umístění. Jediné dva senzory, které nejsou uvedeny ve schématu, jsou optické senzory (žlutý box, šedý box). Jednalo se o senzory, které používali optici. Těmito senzory se tato bakalářská práce nezabývá.





Obr. 17 Fotografie použité měřící techniky.

## 5.3 Konstrukce použitých senzorů

### 5.3.1 Pneumatické senzory

Konstrukce pneumatického senzoru se skládá z trubice, která je z jedné strany uzavřena mikrofonom a na druhé straně utěsněna koncovkou, aby nedocházelo k úniku média. Utěsnění zajistí přímý vztah mezi tlakem a objemem plynu v trubici při konstantní teplotě. Plášť elastické trubice se deformuje a mění svůj objem, vlivem působení okolních pohybových částic. Následkem je změna tlaku v trubici, která se zaznamenává pomocí mikrofonomové membrány.

**Pneumatický senzor 1 (červená trubice)** – Délka trubice 800 mm. Vnější průměr 12 mm, vnitřní průměr 6mm. Pro zaznamenání změny tlaku je použit mikrofón - g.r.a.s microphone type 40 pp pro všechny tři pneumatické senzory.

**Pneumatický senzor 2 (trubice na skle)** - Délka trubice 4900 mm. Vnější průměr 9 mm, vnitřní průměr 6mm. Materiál trubice Polydimethylsiloxan odolný vůči elektromagnetickému rušení.

**Pneumatický senzor 3 (průhledná trubice)**- Délka trubice 2000 mm. Vnější průměr 9 mm, vnitřní průměr 6mm. Materiál trubice Polydimethylsiloxan odolný vůči elektromagnetickému rušení.

### 5.3.2 Akustický senzor

Jako akustický senzor byl použitý mikrofón - g.r.a.s microphone type 40 pp. Jedná se robustní a cenově výhodný mikrofón. Má konektor BNC, který podporuje použití standardních kabelů RG58. Frekvenční rozsah až 20 kHz s velkým dynamickým rozsahem < 30 dB do 135 dB.

### 5.3.3 Seismograf

Seismograf - Jedná se o bateriový přístroj s tříosovým seismickým geofonem a záznamem dat na interní flash paměť o velikosti 64 GB. Seismograf má vlastní SW, který přepočítá naměřená data na rychlost hmotného bodu v mm/s pro tři osy X, Y a Z. Frekvenční a dynamický rozsah závisí na instalovaném geofonu a leží mezi 0,5 Hz a 80 Hz při dynamice 120 dB. Samotný záznamník má pak vstupní dynamický rozsah až 144 dB.

## 5.4 Vyhodnocení naměřených dat

Stěžejním bodem k vyhodnocení dat je provést kalibraci námi zvolených senzorů na základě naměřených údajů z profesionální stanice a stanovit chybu našich senzorů k referenci. Vyhodnocení signálu v časové i frekvenční oblasti (zda bylo nutné použít filtraci či jiné zpracování signálů). Dále stanovit chyby pro všechny použité senzory a určit jejich přesnost.

## 5.5 Záznamy dat a kalibrace signálu

### Záznam dat

Záznamy dat z námi zvolených senzorů probíhaly přes připojení k počítači pomocí National Instruments USB-4431, ve kterém byla spuštěna aplikace LabVIEW a jednotlivé data byly uloženy jako časový průběh. Referenční stanice naměřená data ukládala do své interní flash paměti.

### Kalibrace

Kalibrace signálu byla provedená z prostého důvodu. Námi zvolené senzory měří změnu tlaku v (Pa) zatímco standardní seismická stanice měří rychlost kmitání hmotného bodu (mm / s). Pro zaznamenané signály bylo nutné na základě naměřených údajů z profesionální stanice kalibrovat naše senzory. Jednalo se o převedení jednotky z (Pa) na (mm/s). Kalibrace byla uskutečněná v programu LabVIEW.

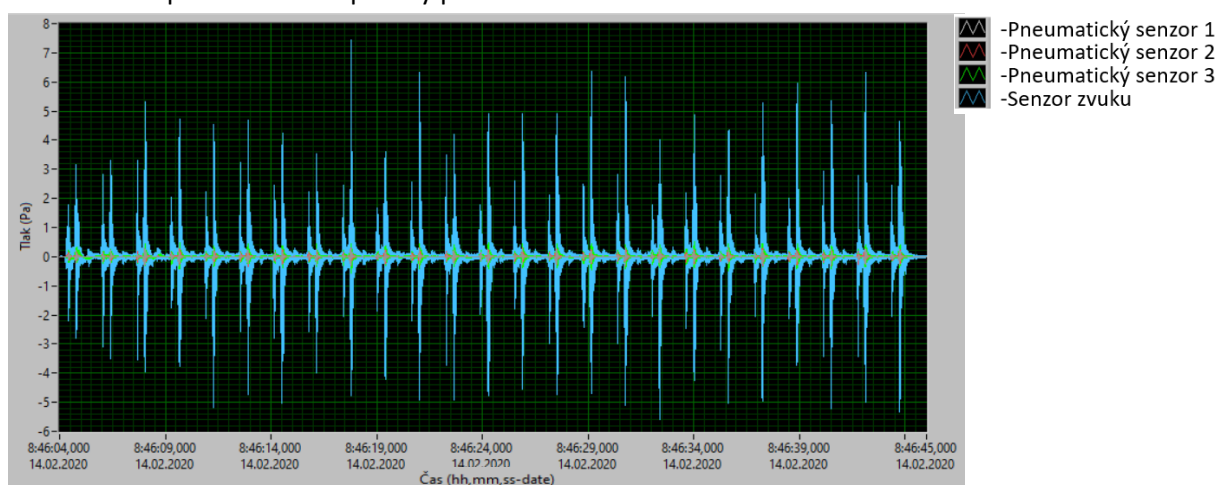
Kalibrace byla vykonána porovnáním lokálních maxim při úderech u různých signálů. Následně byl proveden poměr mezi maximy referenční stanice k námi zvoleným senzorům, tímto krokem byly vypočteny konstanty zesílení pro jednotlivé signály. Tab. 3 obsahuje konstanty zesílení pro jednotlivé vzdálenosti a použítá kladiva.

Vzdálenost 120-140 cm		Pneumatický senzor 1	Pneumatický senzor 2	Pneumatický senzor 3	Akustický senzor
Kladivo velké	Konstanty (mm/s)	3,984	7,235	3,905	0,654
Kladivo malé	Konstanty (mm/s)	3,566	7,439	1,867	0,608
Vzdálenost 60 cm					
Kladivo velké	Konstanty (mm/s)	5,503	8,238	1,453	0,653

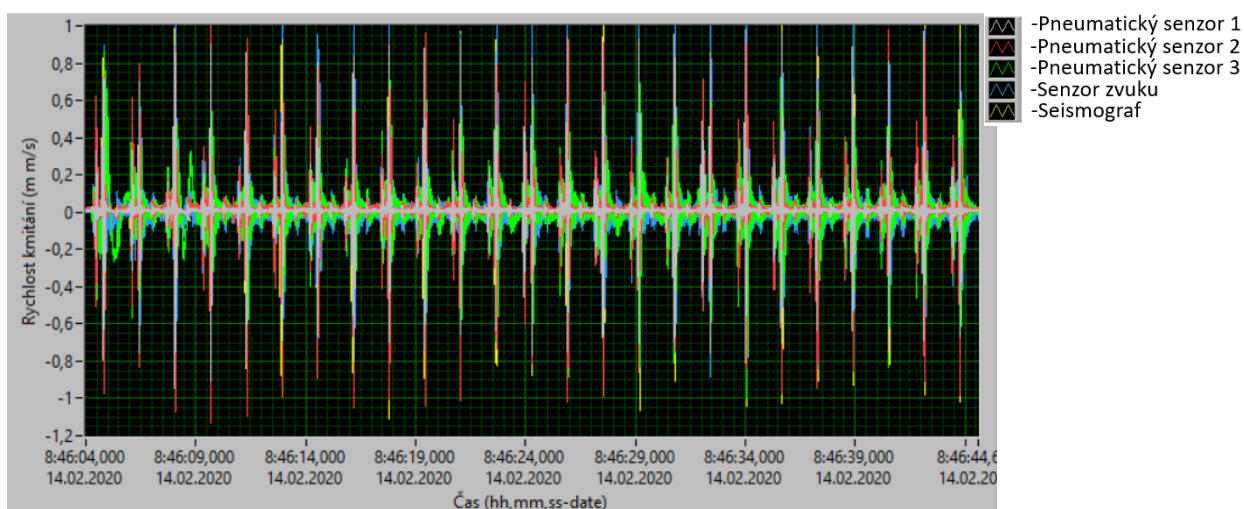
Tab. 3 Konstanty zesílení

Vynásobení signálů konstantami vedlo k sjednocení jednotek námi zvolených senzorů k referenční stanici. Na obr. 18 vidíme sadu 25 úderů pro signály ze senzorů před kalibrací a rozdíl jednotlivých

amplitud (akustický velké hodnoty amplitud, pneumatické senzory malé amplitudy). Na obr. 19 vidíme sadu 25 úderů pro signály po kalibraci, kde jsou jednotlivé signály ve stejných jednotkách a amplitudy se velikostí tolik neliší v porovnání s amplitudy před kalibrací.



Obr. 18 Signály před kalibrací



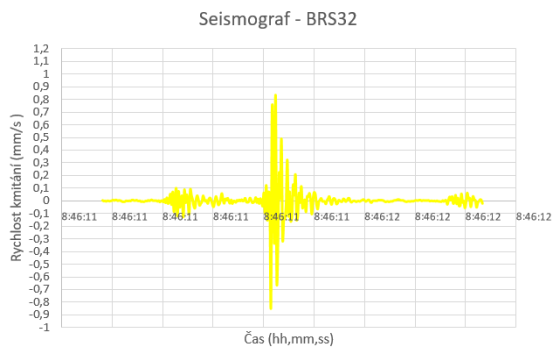
Obr. 19 Signály po kalibraci

## 5.6 Časová oblast senzorů

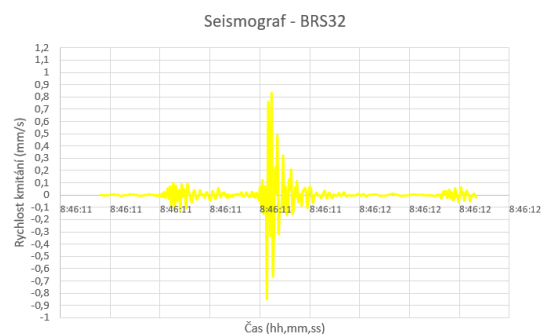
Tato část shrnuje výsledky měření v časové oblasti. Pro lepší vizuální srovnání jsou jednotlivé údery zobrazeny jednotlivě vedle sebe a liší se velikostí použitého kladiva. Vodorovně lze porovnat jednotlivé časové oblasti pro stejný senzor a svisle porovnat časové oblasti senzorů k referenční časové oblasti. Dále bylo zjištěno v časové oblasti, že referenční signál je podvzorkován a následné problémy budou zmíněny v 5.7.

První sada zobrazených obrázků je pro vzdálenost 120 až 140 cm s malým a velkým kladivem. Obr. na levé straně s velkým kladivem, na pravé straně s malým. Obr. 20,21 Referenční časová oblast seismografů, Obr. 23-27 časové oblasti pneumatických senzorů, Obr. 28,29 časová oblast akustického senzorů.

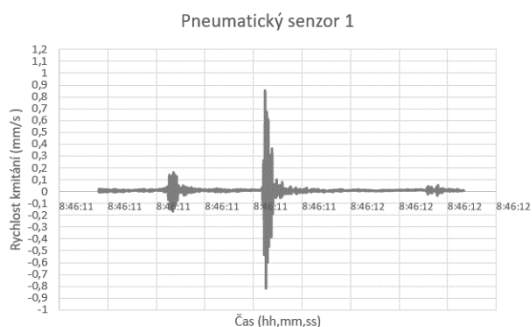
**Vzdálenost 120 až 140 cm, 1 úder, Velké kladivo (VK), Vzdálenost 120 až 140 cm, 1 úder, Malé kladivo (MK).**



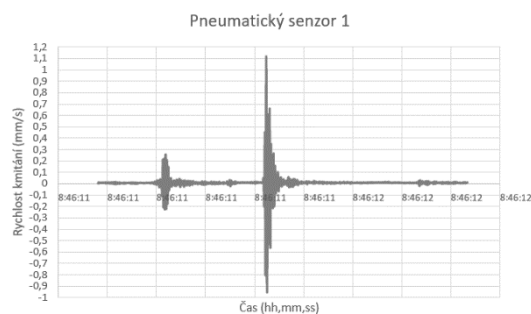
Obr. 20 Časová oblast seismografu (VK).



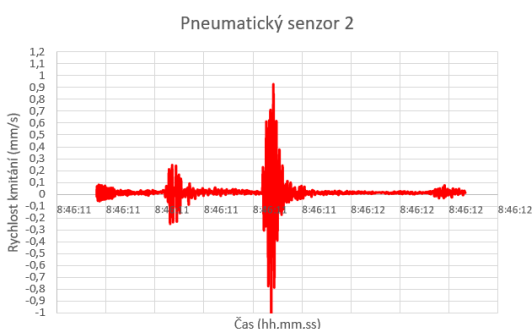
Obr. 21 Časová oblast seismografu (MK).



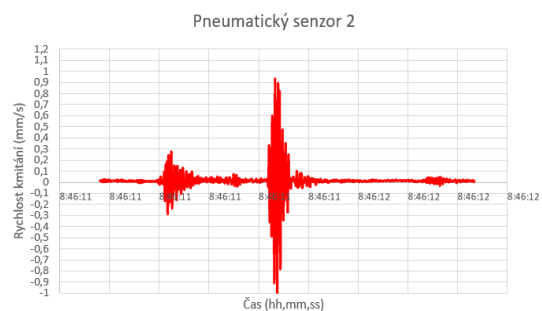
Obr. 22 Časová oblast pneu. senzoru 1 (VK).



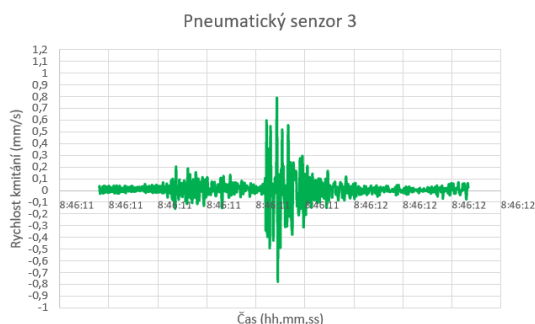
Obr. 23 Časová oblast pneu. senzoru 1 (MK).



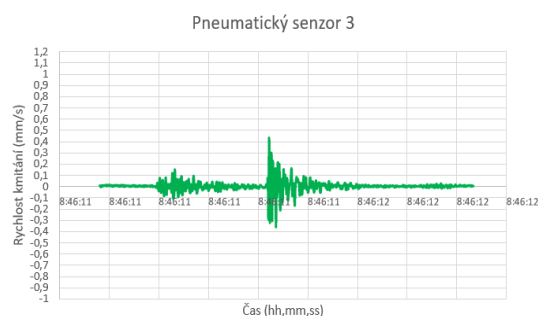
Obr. 24 Časová oblast pneu. senzoru 2 (VK).



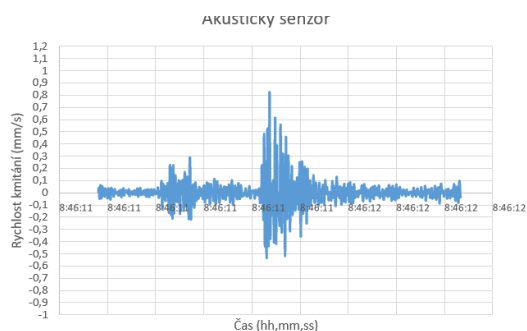
Obr. 25 Časová oblast pneu. senzoru 2 (MK).



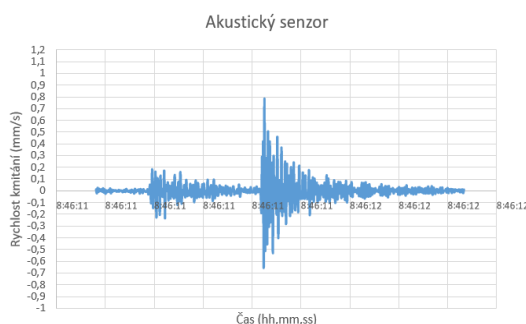
Obr. 26 Časová oblast pneu. senzoru 3 (VK).



Obr. 27 Časová oblast pneu. senzoru 3 (MK).



Obr. 28 Časová oblast akustického senzoru (VK).

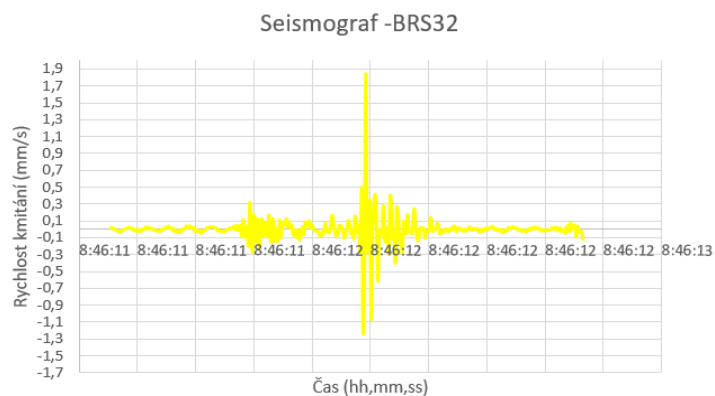


Obr. 29 Časová oblast akustického senzoru (MK).

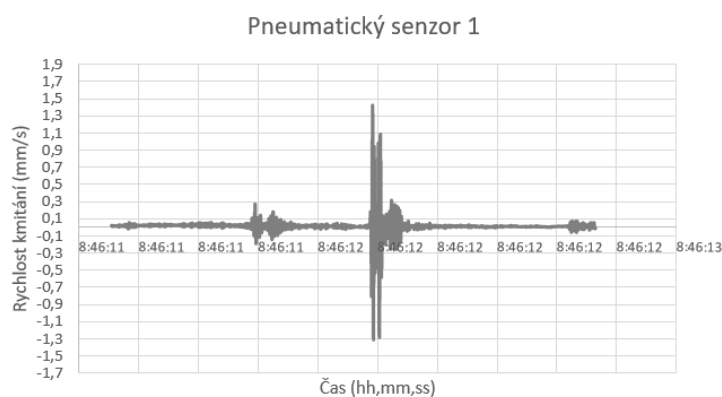
Z porovnání v časových oblastech lze usoudit, že velikost kladiva neměla vliv na velikosti amplitud pro referenční senzor, který zaznamenal téměř stejně velké amplitudy. Pouze v případě u pneumatického senzoru 3 byly zaznamenány podstatně menší amplitudy. Maximální amplitudy pneumatických senzorů se pohybují s určitou odchylkou od referenčního signálu. Časové záznamy také prokazují, že maximální amplitudy nastávají ve stejném čase a délka záznamu vibrací je stejná. Zobrazené časové oblasti slouží k subjektivnímu posouzení. Průměrná hodnota amplitudy ze všech změřených úderů byla pro kladivo velké na vzdálenost 120 cm pro pneu. senzor 1 (0,833 mm/s), pneu. senzor 2 (0,904 mm/s), pneu. senzor 3 (0,700 mm/s), akustický senzor (0,847 mm/s), ref. senzor (0,906 mm/s). Z těchto hodnot se dá stanovit odchylka pro jednotlivý úder na vzdálenost 120 cm s velkým kladivem. Pro malé kladivo byl průměrná hodnota ze všech změřených úderů pro pneu. senzor 1 (0,913 mm/s), pneu. senzor 2 (0,851 mm/s), pneu. senzor 3 (0,365 mm/s), akustický senzor (0,649 mm/s), ref. senzor (0,877 mm/s). Z těchto hodnot se dá stanovit odchylka pro jednotlivý úder na vzdálenost 120 cm s malým kladivem. Dle mého usouzení v časové oblasti se k referenčnímu senzoru nejvíce podobá časový průběh pneumatického senzoru 2. Také časová oblast pneumatického senzoru 1 by se dala považovat za velice podobnou k referenci. Jako nejhorší výsledek vizuálního srovnání senzoru v časové oblasti k referenci, bych stanovil akustický senzor.

Obr. 30-34 zobrazují časové oblasti získané při měření na vzdálenost 60 cm s velkým kladivem. Obrázky jsou pro vizuální porovnání umístěny pod sebou. Na vzdálenost 60 cm neproběhlo měření s malým kladivem, a proto nelze obrázky porovnat stejným způsobem, jako v případě Obr. 20-29.

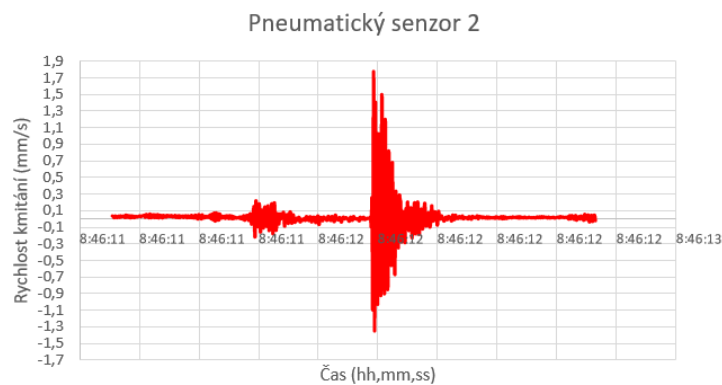
**Vzdálenost 60 cm, 1 úder, Velké kladivo (VK).**



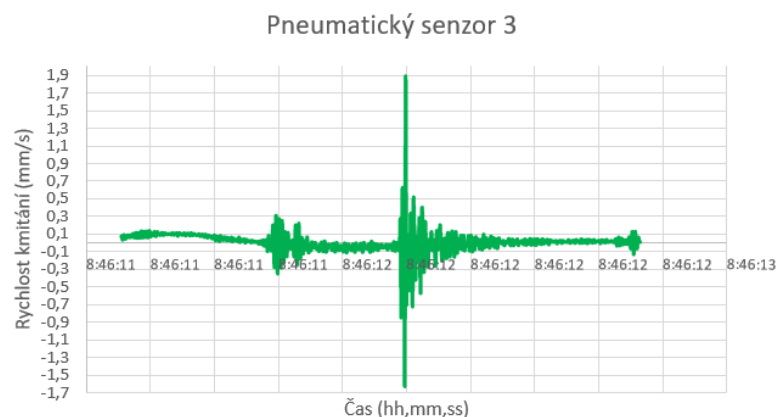
Obr. 30 Časová oblast seismografu (VK).



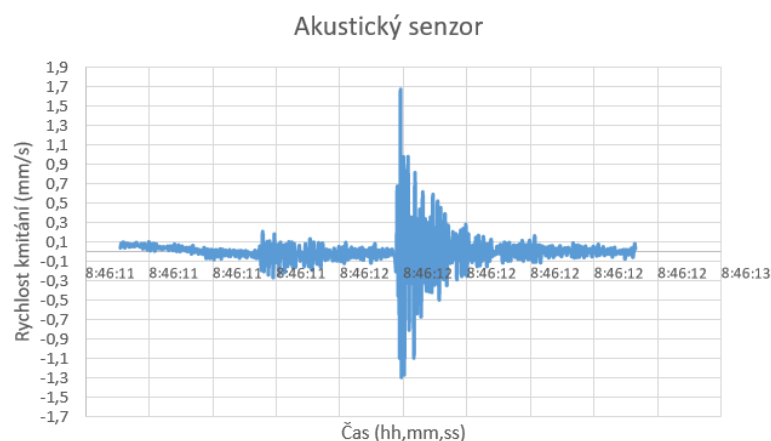
Obr. 31 Časová oblast pneumatického senzoru 1 (VK).



Obr. 32 Časová oblast pneumatického senzoru 2(VK).



Obr. 33 Časová oblast pneumatického senzoru 3 (VK).



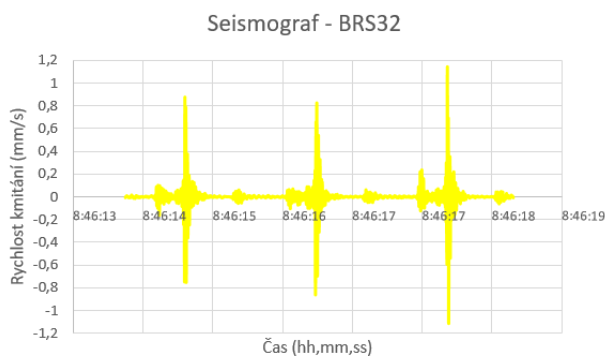
Obr. 34 Časová oblast akustického senzoru (VK).

Z časové oblasti lze vidět, že kratší vzdálenost měla vliv na velikosti maximálních amplitud, které dosahují větších hodnot. Maximální amplitudy nastávají téměř ve stejném čase. Největší odchylku od reference měl pneumatický senzor 1. Max. amplitudy zbylých senzorů se blížily s určitou odchylkou k referenci.

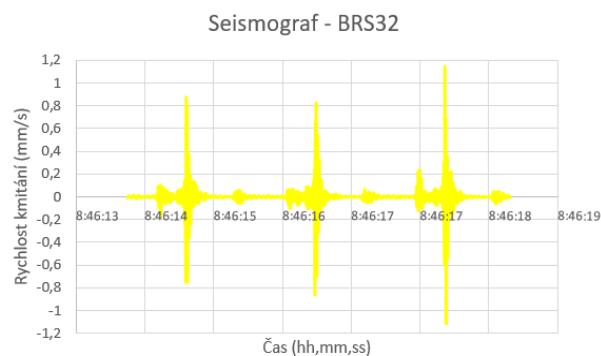
Dále bylo provedeno porovnání 3 úderů. Obr. 35-44 jako v prvním případě, vodorovně lze porovnat jednotlivé časové oblasti pro stejný senzor a svisle porovnat časové oblasti senzorů k referenční časové oblasti. Zobrazené časové oblasti slouží k subjektivnímu posouzení. Průměrná hodnota amplitudy ze všech změřených úderů byla pro kladivo velké na vzdálenost 60 cm pro pneu. senzor 1 (1,503 mm/s), pneu. senzor 2 (1,847 mm/s), pneu. senzor 3 (1,646 mm/s), akustický senzor (1,551 mm/s), ref. senzor (1,829 mm/s). Z těchto hodnot se dá stanovit odchylka pro jednotlivý úder na vzdálenost 60cm s velkým kladivem. Dle mého usouzení v časové oblasti se k referenčnímu senzoru nejvíce podobá časový průběh pneumatického senzoru 1. Také časová oblast pneumatického senzoru 2 by se dala

považovat za velice podobnou k referenci. Jako nejhorší výsledek vizuálního srovnání senzoru v časové oblasti k referenci, bych stanovil akustický senzor.

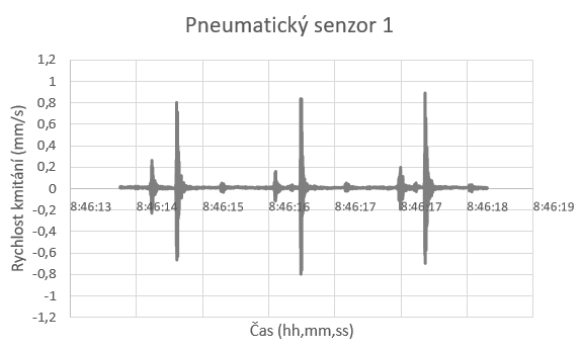
**Vzdálenost 120 až 140 cm, 3 údery, Velké kladivo (VK),** **Vzdálenost 120 až 140 cm, 3 údery, Malé kladivo (MK).**



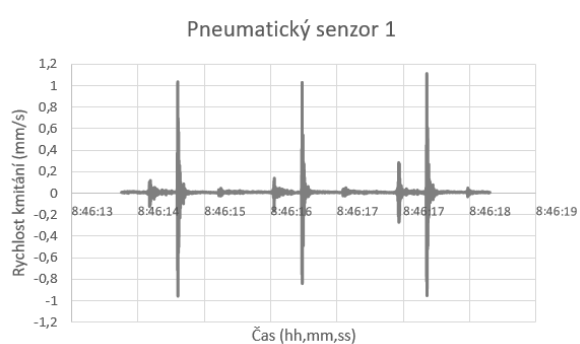
Obr. 35 Časová oblast seismografu (VK).



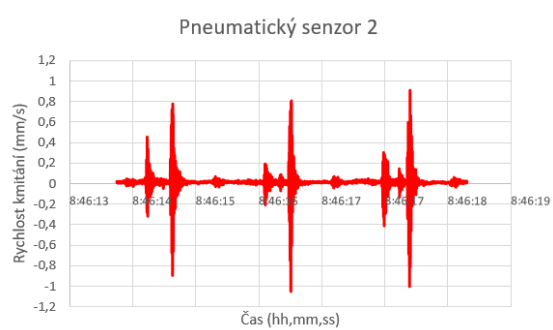
Obr. 36 Časová oblast seismografu (VK).



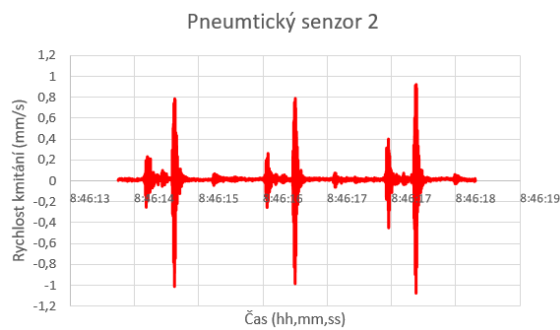
Obr. 37 Časová oblast pneu. senzoru 1 (VK).



Obr. 38 Časová oblast pneu. senzoru 1 (MK).

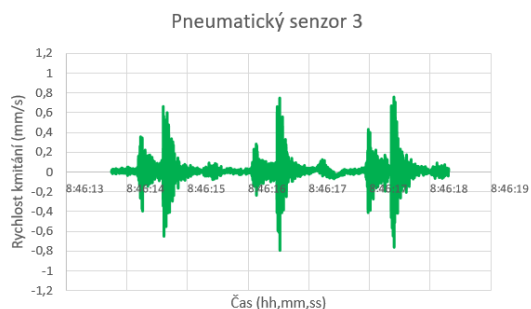


Obr. 39 Časová oblast pneu. senzoru 2 (VK).

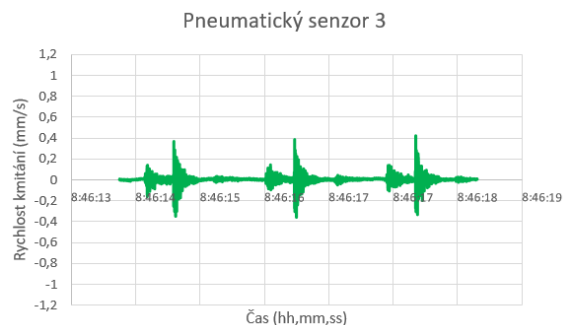


Obr. 40 Časová oblast pneu. senzoru 2 (MK).

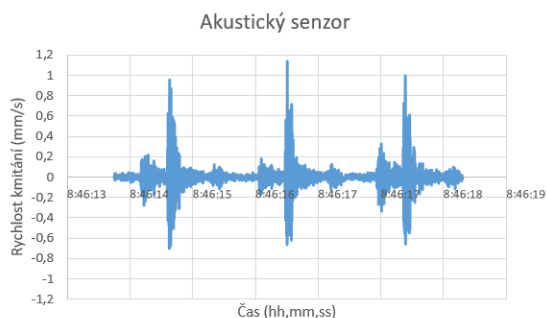




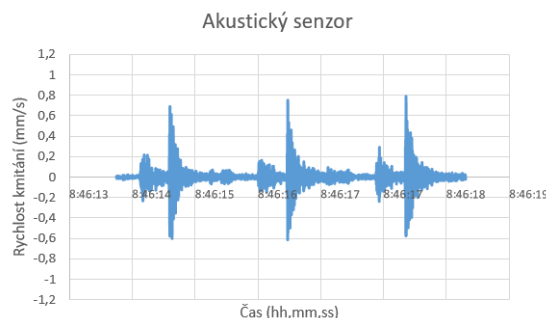
Obr. 41 Časová oblast pneu. senzoru 3 (VK).



Obr. 42 Časová oblast pneu. senzoru 3 (MK).



Obr. 43 Časová oblast akustického senzoru (VK).

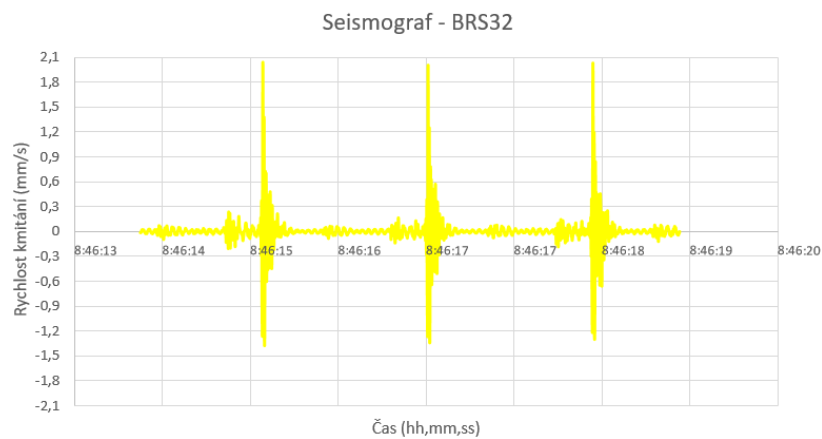


Obr. 44 Časová oblast akustického senzoru (MK).

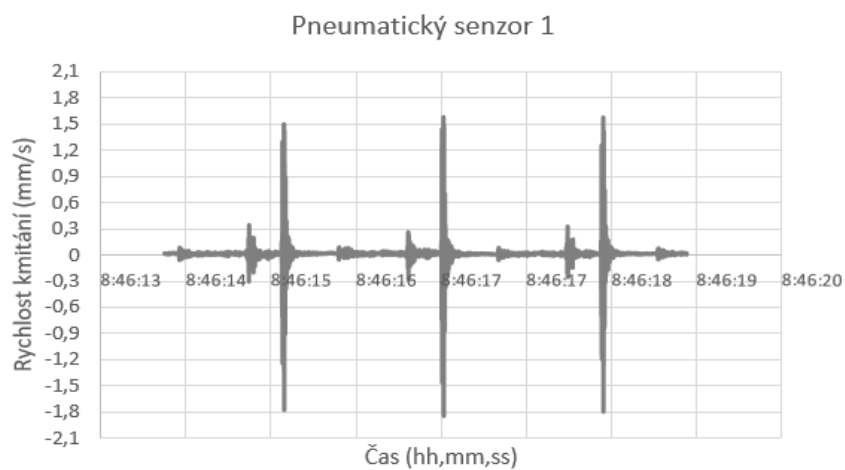
Z porovnání v časových oblastech lze usoudit, že velikost kladiva neměla vliv na velikosti amplitud pro referenční senzor, který naměřil téměř totožné hodnoty. V případě pneumatického senzoru 1 došlo k zaznamenání větších amplitud s menším kladivem, zatímco pneumatický senzor 3 tak i senzor akustický zaznamenali podstatně menší maxima amplitud. Průměrná hodnota amplitudy ze všech změřených úderů byla pro kladivo velké i malé na vzdálenost 120 cm uvedená v časové oblasti pro jeden úder a platí to stejné, že lze od této průměrné hodnoty určit jednotlivé odchylky pro všechny údery. Časové oblasti pro tři údery slouží k subjektivnímu posouzení. Dle mého usouzení v časové oblasti se k referenčnímu senzoru nejvíce podobá časový průběh pneumatického senzoru 1. Také časová oblast pneumatického senzoru 2 by se dala považovat za velice podobnou k referenci. Jako nejhorší výsledek vizuálního srovnání senzorů v časové oblasti k referenci, bych stanovil akustický a pneumatický senzor 3.

#### **Vzdálenost 60 cm, 3 údery, Velké kladivo (VK)**

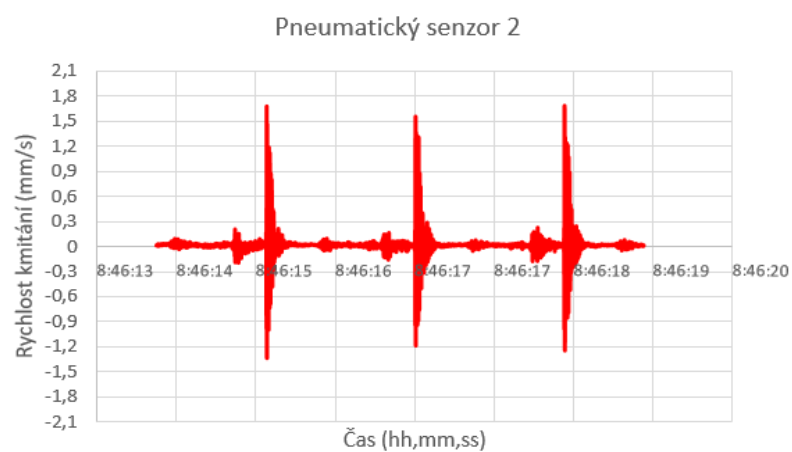
Obrázky 45-49 zobrazují časové oblasti pro 3 údery získané měřením na vzdálenost 60 cm s velkým kladivem. Na vzdálenost 60 cm neproběhlo měření s malým kladivem, a proto nelze obrázky porovnat stejným způsobem, jako v případě obrázků 35-44.



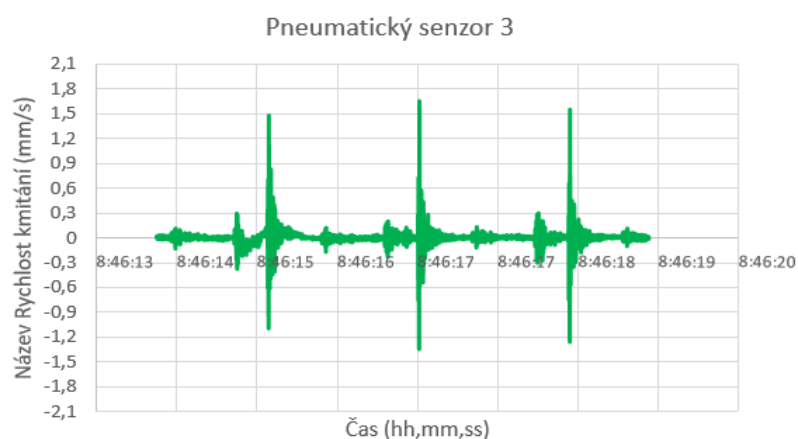
Obr. 45 Časová oblast seismografu (VK).



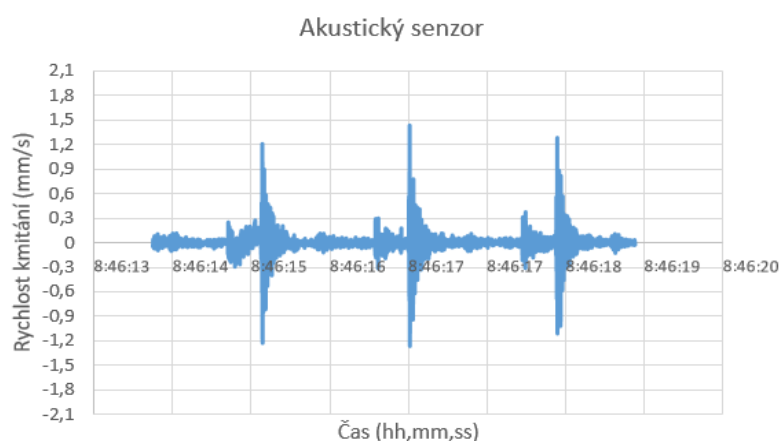
Obr. 46 Časová oblast pneumatického senzoru 1 (VK).



Obr. 47 Časová oblast pneumatického senzoru 2 (VK).



Obr. 48 Časová oblast pneumatického senzoru 3 (VK).

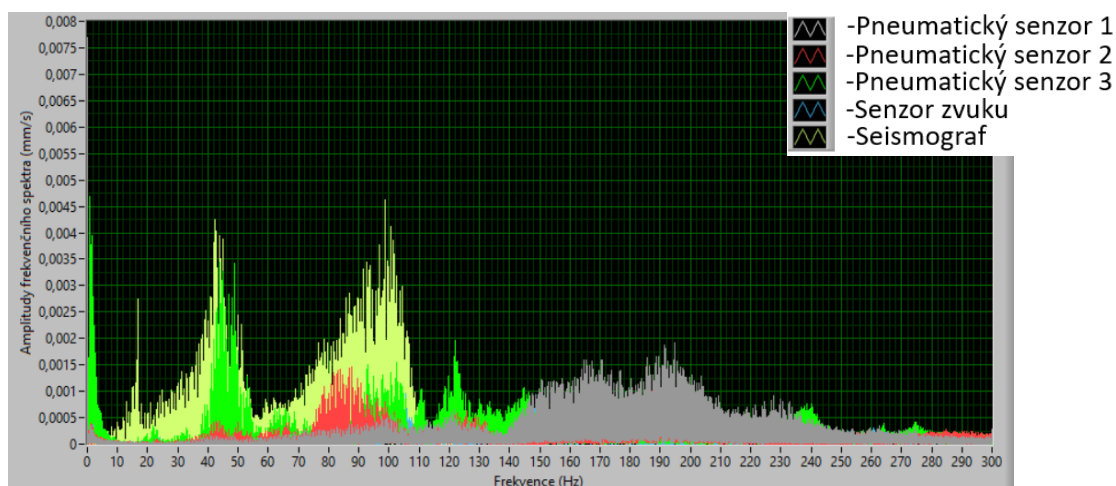


Obr. 49 Časová oblast akustického senzoru (VK).

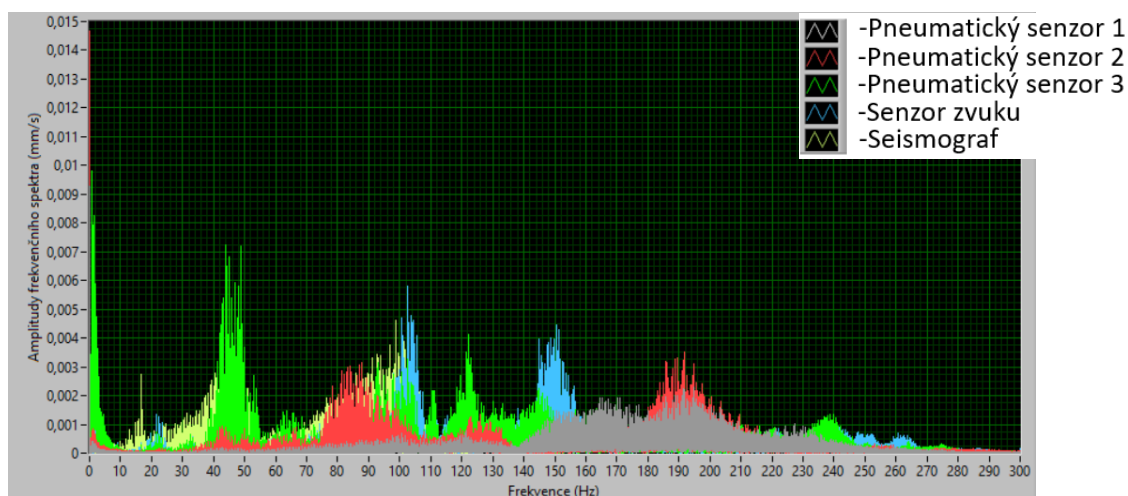
Z časové oblasti lze vidět, že kratší vzdálenost měla vliv na velikosti maximálních amplitud, které dosahují větších hodnot v porovnání s měřením na vzdálenost 120-140cm. Maximální amplitudy nastávají téměř ve stejném čase. Všechny senzory zaznamenaly podstatně menší max. amplitudy než referenční stanice. Průměrná hodnota amplitudy ze všech změřených úderů byla pro kladivo velké na vzdálenost 60 cm uvedená v časové oblasti pro jeden úder a platí to stejné, že lze od této průměrné hodnoty určit jednotlivé odchylky pro všechny údery. Časové oblasti pro tři údery slouží k subjektivnímu posouzení. Dle mého usouzení v časové oblasti se k referenčnímu senzoru nejvíce podobá časový průběh pneumatického senzoru 2. Také časová oblast pneumatického senzoru 1 by se dala považovat za velice podobnou k referenci. Jako nejhorší výsledek vizuálního srovnání senzoru v časové oblasti k referenci, bych stanovil akustický senzor.

## 5.7 Frekvenční oblast senzorů

Analýza signálu ve frekvenční oblasti byla taktéž provedená v programu LabVIEW pomocí funkce FFT (Rychlá Fourierova Transformace). Frekvenční pásmo signálu odhalilo dominantní frekvence signálů, které se pohybovaly do 250 Hz (pro všechna změřená data) obr. 50. Na základě těchto informací byl použit filtr (Dolní propust), k odfiltrování vyšších frekvencí.



Obr. 50 Frekvenční spektrum před filtrací

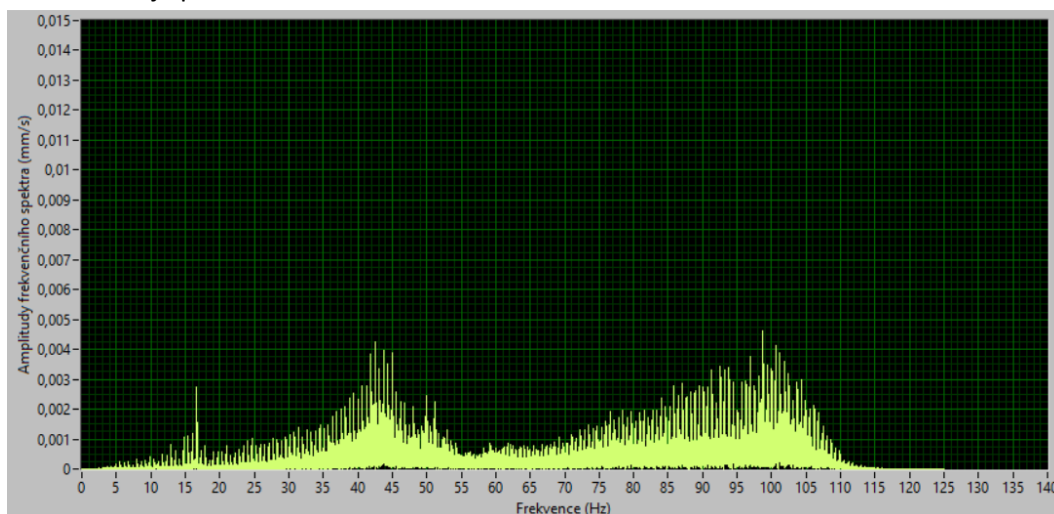


Obr. 51 Frekvenční spektrum po filtraci

Obr. 51 po filtraci signálu bylo možné určit dominantní frekvence jednotlivých signálů. Pro Pneumatický senzor 1 – 190 Hz, Pneumatický senzor 2 – 190 Hz, Pneumatický senzor 3 – 45 Hz, Akustický senzor – 100 Hz, Seismograf – 100 Hz.

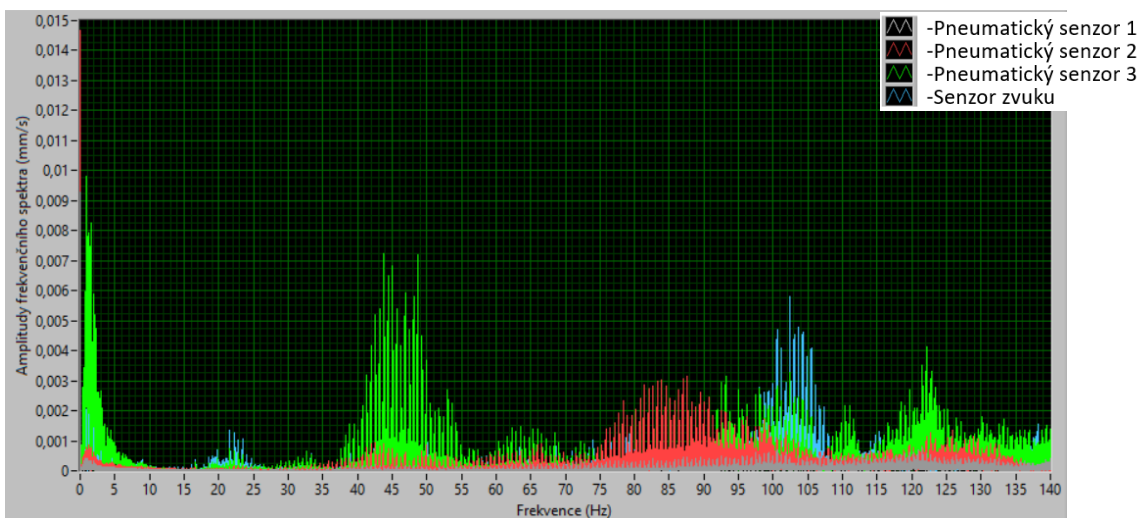
V analýze časové oblasti bylo zmíněno podvzorkování signálu. Hlavním problémem podvzorkovaného referenčního signálu je ztráta vyšších frekvencí, o kterých není nic známo a může docházet k překrytí jednotlivých spektrálních složek, které způsobí zkreslení signálu. Dle vyjádření stavební techniku je pro ně dostačující měřit frekvence do 250 Hz, ale v případě zvolených senzorů se majoritní energie

signálů pohybovala mimo toto pásmo. Na obr. 52 je zobrazené frekvenční spektrum seismografu, a záznam frekvence je pouze do 125 Hz.



Obr. 52 Frekvenční spektrum seismografu

Obr. 53 zobrazuje frekvenční spektrum pro naše senzory, kde se frekvence signálu pohybují za referenční pásmo 125 Hz.



Obr. 53 Frekvenční spektrum senzorů

## 5.8 Stanovení přesnosti senzorů

### 5.8.1 Průběh stanovení přesnosti

Pro stanovení přesností senzorů byl program pro výpočet konstant obohacen další částí programu. Pro stanovení přesnosti bylo nutné vyčíst ze signálů pouze maximální amplitudy jednotlivých úderů. Následně se provedl průměr max. amplitud a ten se odečetl od všech max. amplitud jednotlivých úderu, tím se docílilo vypočtení odchylek. Odchytky se pak pomocí histogramu rozdělily na procento z celkového počtu. Tedy pokud se odchylka úderu rovnala nule, histogram ji zaznamenal jako nulovou odchylku a stanovil z ní celkové procento. Celkové procento záviselo na případech, kolikrát byla daná odchylka zaznamenána. Pokud ze 100 úderů bylo zaznamenáno 20 nulových odchylek, celkové procento pro nulovou odchylku bylo tedy 20%. Tímto způsobem se všechny zaznamenané odchylky zpracovaly a stanovilo se celkové procento jednotlivých odchylek. Tab. 8 reprezentuje výsledky zjištěných maximálních amplitud (Max. A), Průměry amplitud a jednotlivé odchylky. Tabulka obsahuje 25 úderů ze všech senzorů na vzdálenost 120-140 cm a slouží k ukázce získaných dat pomocí programu.

	Pneu.1			Pneu. 2			Pneu. 3			Akustický			Seismograf		
Údery	Max. A	Průměr	Odchylka	Max.A	Průměr	Odchylka	Max.A	Průměr	Odchylka	Max.A	Průměr	Odchylka	Max.A	Průměr	Odchylka
1	0,720	0,883	-0,163	0,739	0,904	-0,165	0,861	0,700	0,161	0,892	0,847	0,045	0,825	0,906	-0,080
2	0,696	0,883	-0,187	0,796	0,904	-0,108	0,522	0,700	-0,178	0,718	0,847	-0,129	0,752	0,906	-0,153
3	0,894	0,883	0,011	0,871	0,904	-0,033	0,862	0,700	0,162	1,093	0,847	0,246	0,986	0,906	0,081
4	0,903	0,883	0,020	1,058	0,904	0,154	0,857	0,700	0,158	0,910	0,847	0,063	0,907	0,906	0,002
5	0,855	0,883	-0,028	0,928	0,904	0,024	0,791	0,700	0,091	0,825	0,847	-0,022	0,833	0,906	-0,073
6	0,924	0,883	0,041	0,804	0,904	-0,100	0,773	0,700	0,074	1,132	0,847	0,285	0,903	0,906	-0,003
7	0,804	0,883	-0,079	0,778	0,904	-0,127	0,664	0,700	-0,036	0,955	0,847	0,108	0,864	0,906	-0,042
8	0,840	0,883	-0,043	0,808	0,904	-0,096	0,749	0,700	0,050	1,137	0,847	0,290	0,825	0,906	-0,081
9	0,892	0,883	0,009	0,910	0,904	0,006	0,760	0,700	0,060	0,998	0,847	0,150	1,144	0,906	0,238
10	0,881	0,883	-0,002	0,960	0,904	0,056	0,686	0,700	-0,014	0,742	0,847	-0,105	0,846	0,906	-0,060
11	0,922	0,883	0,039	0,785	0,904	-0,119	0,662	0,700	-0,038	0,956	0,847	0,109	0,966	0,906	0,060
12	0,855	0,883	-0,028	0,786	0,904	-0,118	0,782	0,700	0,083	1,097	0,847	0,250	0,927	0,906	0,021
13	0,824	0,883	-0,059	0,766	0,904	-0,138	0,702	0,700	0,003	1,045	0,847	0,198	0,816	0,906	-0,090
14	0,939	0,883	0,056	0,923	0,904	0,019	0,858	0,700	0,159	1,048	0,847	0,201	0,952	0,906	0,046
15	0,942	0,883	0,059	0,912	0,904	0,008	0,805	0,700	0,106	0,887	0,847	0,039	1,021	0,906	0,116
16	0,929	0,883	0,046	0,644	0,904	-0,260	0,685	0,700	-0,015	1,133	0,847	0,286	1,094	0,906	0,188
17	0,957	0,883	0,074	0,774	0,904	-0,130	0,842	0,700	0,142	1,045	0,847	0,198	0,944	0,906	0,038
18	0,854	0,883	-0,029	0,859	0,904	-0,045	0,749	0,700	0,049	1,004	0,847	0,157	0,848	0,906	-0,058
19	0,975	0,883	0,092	0,900	0,904	-0,005	0,765	0,700	0,066	1,139	0,847	0,292	1,006	0,906	0,100
20	0,970	0,883	0,087	0,878	0,904	-0,027	0,757	0,700	0,057	0,827	0,847	-0,020	1,087	0,906	0,182
21	0,884	0,883	0,001	0,837	0,904	-0,067	0,680	0,700	-0,020	1,002	0,847	0,154	0,909	0,906	0,004
22	0,889	0,883	0,006	0,635	0,904	-0,270	0,747	0,700	0,047	1,068	0,847	0,221	0,942	0,906	0,036
23	0,813	0,883	-0,070	0,976	0,904	0,072	0,813	0,700	0,113	0,870	0,847	0,023	0,902	0,906	-0,004
24	0,967	0,883	0,084	0,917	0,904	0,012	0,866	0,700	0,166	0,978	0,847	0,131	1,040	0,906	0,134
25	0,915	0,883	0,033	0,876	0,904	-0,028	0,699	0,700	0,000	0,888	0,847	0,041	1,070	0,906	0,165

Tab. 4 Výsledné hodnoty pro jednotlivé údery vzdálenost (120cm)

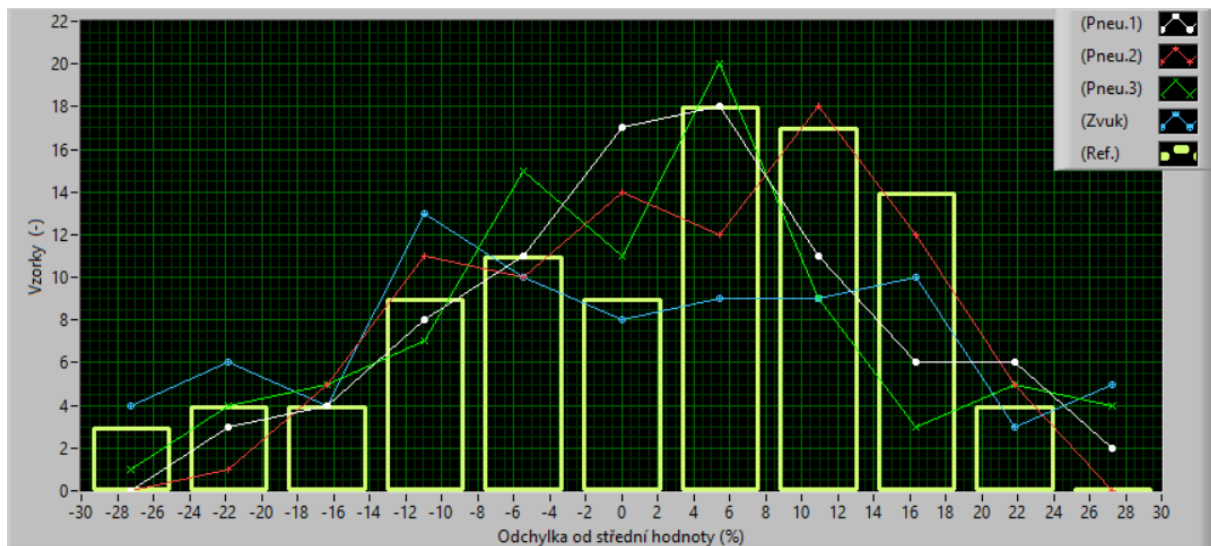
Tab. 4 obsahuje 25 údery ze všech senzorů na vzdálenost 60 cm a slouží k ukázce získaných dat (část) pomocí programu. Tabulky 4-5 jsou ukázány pouze pro 25 úderů, jelikož celkový počet všech zpracovaných úderů je 400.

	Pneu.1			Pneu.2			Pneu.3			Akustický			Seismograf		
Údery	Max. A	Průměr	Odychlka	Max. A	Průměr	Odychlka	Max. A	Průměr	Odychlka	Max. A	Průměr	Odychlka	Max. A	Průměr	Odychlka
1	1,688	1,503	0,185	1,473	1,847	-0,374	1,520	1,646	-0,126	1,189	1,551	-0,362	1,855	1,829	0,027
2	1,707	1,503	0,204	1,600	1,847	-0,247	1,397	1,646	-0,249	1,292	1,551	-0,258	1,976	1,829	0,148
3	1,370	1,503	-0,133	1,654	1,847	-0,193	1,726	1,646	0,080	1,475	1,551	-0,076	2,033	1,829	0,204
4	1,533	1,503	0,030	1,596	1,847	-0,251	1,548	1,646	-0,098	1,263	1,551	-0,287	2,212	1,829	0,383
5	1,285	1,503	-0,219	1,691	1,847	-0,156	1,295	1,646	-0,351	1,177	1,551	-0,374	1,734	1,829	-0,095
6	1,787	1,503	0,284	1,610	1,847	-0,237	1,653	1,646	0,007	1,411	1,551	-0,139	1,842	1,829	0,014
7	1,424	1,503	-0,080	1,756	1,847	-0,091	1,628	1,646	-0,018	1,462	1,551	-0,089	1,939	1,829	0,111
8	1,422	1,503	-0,081	1,900	1,847	0,053	2,094	1,646	0,448	1,921	1,551	0,370	2,046	1,829	0,217
9	1,657	1,503	0,153	1,789	1,847	-0,058	1,602	1,646	-0,044	1,517	1,551	-0,033	2,169	1,829	0,340
10	1,567	1,503	0,064	1,811	1,847	-0,036	1,585	1,646	-0,061	1,603	1,551	0,052	2,034	1,829	0,205
11	1,598	1,503	0,095	1,862	1,847	0,015	1,854	1,646	0,208	1,845	1,551	0,295	1,373	1,829	-0,456
12	1,493	1,503	-0,011	1,935	1,847	0,088	1,731	1,646	0,086	1,837	1,551	0,286	2,128	1,829	0,299
13	1,634	1,503	0,131	2,080	1,847	0,233	2,279	1,646	0,633	2,179	1,551	0,629	1,272	1,829	-0,556
14	1,404	1,503	-0,099	2,006	1,847	0,159	1,846	1,646	0,200	1,926	1,551	0,375	1,967	1,829	0,138
15	1,673	1,503	0,170	1,997	1,847	0,150	1,566	1,646	-0,080	1,795	1,551	0,244	1,954	1,829	0,126
16	1,643	1,503	0,140	1,996	1,847	0,149	1,754	1,646	0,108	1,929	1,551	0,378	1,757	1,829	-0,072
17	1,671	1,503	0,167	2,114	1,847	0,267	1,708	1,646	0,062	1,923	1,551	0,372	1,946	1,829	0,117
18	1,590	1,503	0,087	2,142	1,847	0,295	2,214	1,646	0,568	2,115	1,551	0,564	1,964	1,829	0,135
19	1,332	1,503	-0,172	2,030	1,847	0,183	1,658	1,646	0,012	1,769	1,551	0,218	1,641	1,829	-0,188
20	1,416	1,503	-0,087	1,766	1,847	-0,081	1,359	1,646	-0,287	1,345	1,551	-0,206	1,779	1,829	-0,050
21	1,865	1,503	0,362	1,816	1,847	-0,031	1,504	1,646	-0,142	1,395	1,551	-0,156	1,241	1,829	-0,588
22	1,425	1,503	-0,078	1,964	1,847	0,117	1,753	1,646	0,107	1,734	1,551	0,183	1,895	1,829	0,067
23	1,377	1,503	-0,126	2,009	1,847	0,162	1,999	1,646	0,353	1,791	1,551	0,240	1,949	1,829	0,120
24	1,795	1,503	0,292	1,857	1,847	0,010	1,513	1,646	-0,133	1,463	1,551	-0,087	2,017	1,829	0,188
25	1,774	1,503	0,270	1,834	1,847	0,013	1,479	1,646	-0,167	1,720	1,551	0,169	1,648	1,829	-0,180

Tab. 5 Výsledné hodnoty pro jednotlivé údery, vzdálenost (60cm)

## 5.8.2 Histogramy

Jak již bylo řečeno v kapitole 5.8.1, stanovení přesnosti senzorů se odvíjí od získaných odchylek, které jsou zobrazeny v konečné podobě jako histogram odchylek. Obr. 54 znázorňuje histogram odchylek s velkým kladivem na vzdálenost 60 cm.



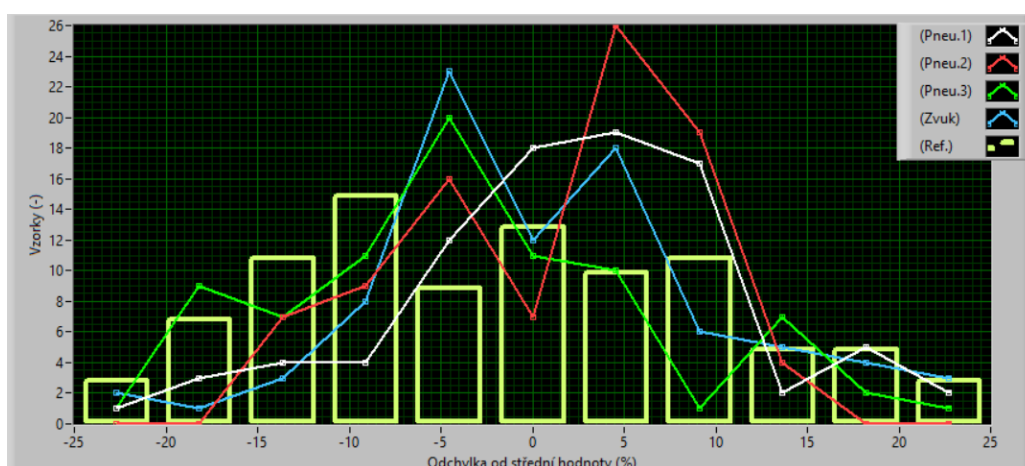
Obr. 54 Histogram odchylek (60cm, velké kladivo)

Hodnoty na ose Y odpovídají počtu vzorků, které dosáhly určité odchylky od střední hodnoty. Osa X uvádí procentuální velikost jednotlivých odchylek. Histogram na Obr. 54 zobrazuje výsledné procentuální odchylky, s jakými měřily jednotlivé senzory. Nejlepší výsledek dosáhl pneumatický senzor 1, který naměřil 17 vzorků s  $\pm 2\%$  odchylkou, následoval pneumatický senzor 2 s 14 vzorky,



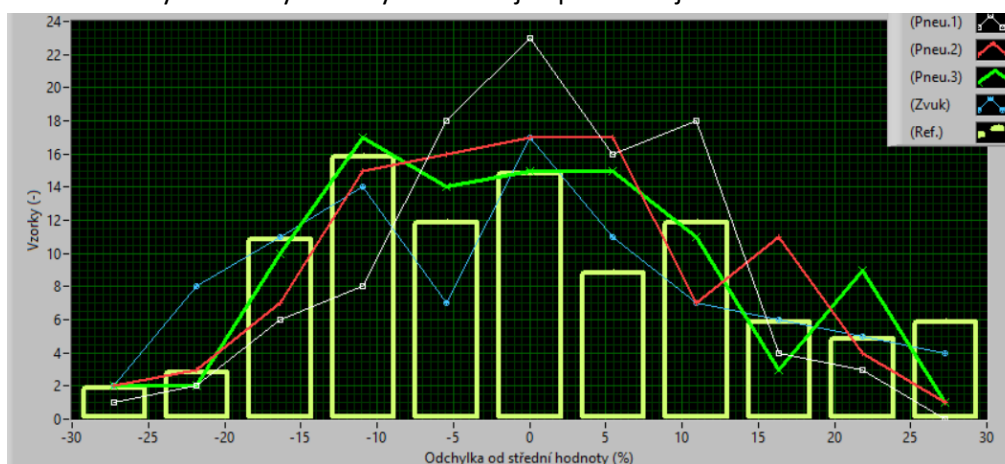
pneumatický senzor 3 s 11 vzorky, referenční senzor s 9 vzorky a nejmenší počet s touto odchylkou zaznamenal akustický senzor s 8 vzorky.

Obr. 55 histogram odchylek s malým kladivem na vzdálenost 120 cm. Z porovnání dosáhl nejlepší výsledek pneumatický senzor 1, který naměřil 18 vzorků s  $\pm 2,3$  % odchylkou, následoval referenční senzor s 13 vzorky, akustický senzor s 12 vzorky, pneumatický senzor 3 s 11 vzorky a nejmenší počet s touto odchylkou zaznamenal pneumatický senzor 2 s 7 vzorky.



Obr. 55 Histogram odchylek (120cm, malé kladivo)

Obr. 56 histogram odchylek s velkým kladivem na vzdálenost 120 cm. Z porovnání dosáhl nejlepší výsledek pneumatický senzor 1, který naměřil 23 vzorků s  $\pm 2$  % odchylkou, následoval akustický a pneumatický senzor 2 s 17 vzorky, nejmenší počet s touto odchylkou zaznamenal referenční senzor tak i senzor pneumatický 3 se 14 vzorky. V konečném porovnání ze tří měření dosáhl největší úspěšnost měření s nejmenší odchylkou pneumatický senzor 1, který dokonce měřil s větší přesností, než referenční senzor. Zbylé senzory dosáhly téměř stejné přesnosti jako referenční senzor.



Obr. 56 Histogram odchylek (120cm, velké kladivo)



## 6 Závěr

V závěru bych chtěl zhodnotit dosažené výsledky této práce. Použitá aplikace LabVIEW posloužila v první části práce hlavně k zobrazení signálu v časové oblasti, díky které bylo možné si naměřená data projít a porovnat rozdíly v záznamech oproti referenčnímu signálu. Zjistily se jednotlivé časové rozdíly a bylo nutné s nimi počítat. Následně bylo zapotřebí kalibrovat pneumatické signály na základě referenčního signálu, jednalo se o rozdílné jednotky a bylo, je nutné sjednotit. Po úspěšně provedené kalibraci se program rozrostl o další část, která měla za úkol provést statistické zhodnocení signálů. Jednalo se o získání maximálních amplitud pro jednotlivé údery ze všech záznamů, a určení jednotlivých odchylek. Na základě odchylek bylo provedené stanovení přesnosti pro všechny použité senzory. Dále se ověřil předpoklad, že i snímače na jiném fyzikálním principu dosahují velmi dobré výsledky v porovnání s profesionální měřicí technikou. Nízkonákladové pneumatické senzory z vyhodnocených dat dosáhly velmi podobné záznamy v časové oblasti jako referenční senzor. Statistickým zpracováním všech úderu dokonce byly zjištěny podstatně lepší výsledky v přesnosti pro pneumatické senzory než v případě referenčního senzoru, ale je potřeba brát výsledky s nadhledem, jelikož statistické zpracování signálů proběhlo pouze pro kladnou část signálu, tedy pouze pro maximální amplitudy v kladné části. Výsledky experimentálního měření můžeme považovat za velmi úspěšné, osobně jsem byl překvapený, že jednotlivé pneumatické senzory dosáhly tak dobré výsledky.

Díky této práci jsem se dozvěděl nové informace z oblasti měření vibrací, a zpracování konkrétního signálů, který vibracemi vzniká. Velmi zajímavé mi přišly jednotlivé konstrukce pneumatických senzorů, které jsou velmi jednoduše provedeny a přitom mohou v budoucnu nahradit drahé seismografy ve stavebnictví. Myslím si, že tyto senzory mají potenciál a jsem rád za získanou zkušenost a možnost s těmito senzory pracovat.

## Literatura

- [1] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [2] Vznik a druhy vlnění. *Fyzika007* [online]. [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/vznik-a-druhy-vlneni>
- [3] Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine. *ScienceDirect* [online]. [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726108001255>
- [4] KOSTELNÍK, Jan. *Analýza šíření vibrací spojen strukturálně akustickým prostorem* [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor verejne.php?file\\_id=39077](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor verejne.php?file_id=39077). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Novotný.
- [5] STOLARÍK, Martin. *Studium seizmických projevů v okolí ražby mělkých podzemních děl* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: [http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/90349/STO118\\_FAST\\_P3607\\_3607V035\\_201\\_1.pdf?sequence=1&isAllowed=n](http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/90349/STO118_FAST_P3607_3607V035_201_1.pdf?sequence=1&isAllowed=n). Disertační práce doktorského studia. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství. Vedoucí práce Zdeněk Kaláb.
- [6] ŠKEŘÍK, Jan. *Problematika technické seizmicity při budování podzemních děl* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74288/F1-DP-2018-Skerik-Jan-PROBLEMATIKA%20TECHNICKE%20SEIZMICITY%20PRI%20BUDOVANI%20PODZEMNICH%20DEL.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra geotechniky. Vedoucí práce Jan Pruška.
- [7] HOVORKA, Václav. *Vibrace v pracovním prostředí* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/69025/B3908.3908R001.hov029.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Vedoucí práce Světlá Fišerová.
- [8] GAŠPAR, Dominik. *Měření vibrací a hluku pohonných jednotek* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor verejne.php?file\\_id=126785](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor verejne.php?file_id=126785). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Lukáš Šopík.

- [9] KREJČÍKOVÁ, Alena. Postupné vlnění. *SlidePlayer* [online]. 2013 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2907979>
- [10] PIRNER, Miroš. Životní prostředí a technická seizmicita. *Časopis stavebnictví* [online]. Praha, 2009 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: [https://www.casopisstavebnictvi.cz/zivotni-prostredi-a-technicka-seizmicita\\_N2118](https://www.casopisstavebnictvi.cz/zivotni-prostredi-a-technicka-seizmicita_N2118) .
- [11] NEDOMA, Jan, Martin STOLARIK, Stanislav KEPÁK, Miroslav PINKA, Radek MARTINEK, Jaroslav FRNDA a Michael FRIDRICH. Alternative Approaches to Measurement of Ground Vibrations Due to the Vibratory Roller: A Pilot Study. *MDPI Open Access Journals*. 2019, **2019**(1), 17. DOI: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/24/5420>
- [12] NEDOMA, Jan, Martin STOLARIK, Stanislav KEPÁK, Miroslav PINKA, Radek MARTINEK a Jakub KOLARIK. Alternative Approaches to Vibration Measurement Due to the Blasting Operation: A Pilot Study. *MDPI Open Access Journals*. 2019, **2019**(1), 24. DOI: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/19/4084>
- [13] Co je snímač zrychlení (akcelerometr) a vibrometr / analyzátor vibrací? *Adash* [online]. Ostrava: Adash [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: [13] <https://adash.com/cs/vibracni-diagnostika/akcelerometr-vibrometr-analyzator-vibraci/>
- [14] POLÁK, Martin. *Volba a použití akcelerometru při měření vibrací* [online]. Pardubice, 2010 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/36729/PolakM\\_Volba%20a%20pouziti\\_PK\\_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/36729/PolakM_Volba%20a%20pouziti_PK_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y) . Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Pavel Kukla.
- [15] KAŠPÁREK, Petr. *INTELIGENTNÍ DETEKTOR VODÍKU* [online]. Brno, 2013 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30298943.pdf> . Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Jaroslav Boušek.
- [16] Seismografy a Seismické pozorovací sítě. *DOCPLAYER* [online]. 2017 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/19037593-Seismografy-a-seismicke-pozorovaci-site-maji-pro-seismo.html>
- [17] Rovnice postupné vlny. *Fyzika007* [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/rovnice-postupne-vlny>
- [18] Mechanické vlnění pro vyšší gymnázium. *Jarjurek.cz* [online]. Jaromír Juřek, 2016 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: [https://www.jarjurek.cz/vyuka/mechanicke\\_vlneni\\_ucebnice\\_vyssi\\_gymnazium.pdf](https://www.jarjurek.cz/vyuka/mechanicke_vlneni_ucebnice_vyssi_gymnazium.pdf)

- [19]WEIGL, Martin. *Měření vibrací* [online]. Brno, 2011 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=41669](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41669) .  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních stroju, systému a robotiky. Vedoucí práce Martin Musil.
- [20]VEČEŘOVÁ, Ivana. *Využití moderních akcelerometrů ve snímačích polohy* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/87858/VEC099\\_FMMI\\_B3922\\_3902R040\\_2011.pdf?sequence=1](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/87858/VEC099_FMMI_B3922_3902R040_2011.pdf?sequence=1) . Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství , Katedra automatizace a počítačové techniky v metalurgii. Vedoucí práce Romana Garzinová.
- [21]D.ALCUDIA, Alejandro, Robert STEWART a Kevin HALL. *Field comparison of 3-C geophones and microphones to highprecision blasting sensors* [online]. 2008, , 20 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.crewes.org/ForOurSponsors/ResearchReports/2008/2008-07.pdf>